

# SUSTENTABILIDAD ENERGÉTICA, MEDIOAMBIENTE Y SOCIEDAD:

Avances en la  Agenda 2030



Efraín Gómez Arias  
Esmeralda Cervantes Rendón  
Antonio Rodríguez Martínez



El Colegio de  
Chihuahua  
Institución Pública de Investigación y Posgrado



# SUSTENTABILIDAD ENERGÉTICA, MEDIOAMBIENTE Y SOCIEDAD:

Avances en la  Agenda 2030

Efraín Gómez Arias  
Esmeralda Cervantes Rendón  
Antonio Rodríguez Martínez



El Colegio de  
Chihuahua  
Institución Pública de Investigación y Posgrado



© El Colegio de Chihuahua  
Calle Partido Díaz 4723  
Colonia Progresista, C.P. 32310  
Ciudad Juárez, Chihuahua, México  
Tel. +52 656 639 0397  
www.colech.edu.mx



Este texto fue sometido a doble proceso ciego a cargo de académicos externos a esta institución.

Primera edición en formato electrónico 2024.  
ISBN: 978-607-8214-82-2

Coordinación de los procesos editoriales: E. Liliana Chaparro Vielma  
Diseño de cubierta y diagramación: Regina García  
Corrección y edición: Joel Amaya Gardea



Licencia Creative Commons:  
Atribución – No Comercial – Sin Derivadas.

---

**PUBLICACIÓN EN ACCESO ABIERTO:** Se autoriza cualquier reproducción total o parcial de esta obra, siempre y cuando sea sin fines de lucro o para usos estrictamente académicos, citando invariablemente la fuente sin alteración del contenido y dando los créditos autorales.

**Hecho en México**  
Made in Mexico

# TABLA DE CONTENIDO

## 6 Introducción

*Efraín Gómez Arias, Esmeralda Cervantes Rendón,  
Antonio Rodríguez Martínez*

---

## PARTE I. APLICACIONES EN MÉXICO DE LAS ENERGÍAS RENOVABLES

### 22 Capítulo 1. Modelación geoquímica y térmica de sistemas geotérmicos cortical y marino

*Efraín Gómez Arias*

### 56 Capítulo 2. Escenarios de desarrollo sostenible en una zona de exploración geotérmica y un campo geotermoeléctrico en Puebla, México

*Marcó Antonio García Zárate, Zayre Ivonne González Acevedo,  
Ricardo Eaton González*

### 112 Capítulo 3. Nanofluidos para el mejor aprovechamiento térmico de la energía solar

*Yuridiana Rocío Galindo Luna, Federico González, Víctor Rentería,  
Enrique Barrera Calva*

### 135 Capítulo 4. Sustentabilidad energética con tecnologías de almacenamiento electroquímico

*Viridiana Aca López, Erick Leonel Espinosa Villatoro, Juan David Garay  
Marín, Óscar Pérez Díaz, Enrique Quiroga González*

- 162** **Capítulo 5.** Importancia socioambiental de la biomasa forestal en comunidades rurales: ejido La Reforma, municipio de Palenque, Chiapas  
*Julio César López Reyes, Pascual López de Paz, Marcelino García Benítez*
- 185** **Capítulo 6.** Sistemas para una producción agrícola sustentable basada en energías renovables: caso de estudio en Valles Centrales, Oaxaca  
*Ulises Dehesa Carrasco, Jonathan Ibarra Bahena*
- 

## **PARTE II. REFLEXIONES SOBRE LA AGENDA 2030 Y LA ENERGÍA**

- 211** **Capítulo 7.** Retos para una transición socioenergética: caso Chihuahua, México  
*Esmeralda Cervantes Rendón, Gabriela Montano Armendáriz*
- 240** **Capítulo 8.** La permisividad de lo ilegal: exclusión social por pobreza energética en zonas marginales en Ciudad Juárez, México  
*Hazel Dávalos Chargoy, Ana Eréndira Rascón Villanueva*
- 271** **Capítulo 9.** La democracia energética en México. Una tarea pendiente  
*Luis Ramón Moreno Moreno, Virginia Guadalupe López Torres*
- 307** **Capítulo 10.** Consumo de energía en el sector residencial, eficiencia energética y opciones de mitigación de gases de efecto invernadero  
*Rodolfo Díaz Jiménez*

# INTRODUCCIÓN

**Efraín Gómez Arias,<sup>1</sup> Esmeralda Cervantes Rendón,<sup>2</sup>  
Antonio Rodríguez Martínez<sup>3</sup>**

<sup>1</sup> Investigador por México Conahcyt-Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, Baja California. Ensenada, Baja California, 22860, México. Correo electrónico: gomezar@cicese.mx

---

<sup>2</sup> Doctora en Investigación. Profesora de tiempo completo de El Colegio de Chihuahua. Calle Partido Díaz 4723 esquina con Anillo Envolvente del Pronaf, 32310, Ciudad Juárez, Chihuahua, México. Correo electrónico: ecervantes@colech.edu.mx

---

<sup>3</sup> El Colegio de Chihuahua. Calle Partido Díaz 4723 esquina con Anillo Envolvente del Pronaf, 32310, Ciudad Juárez, Chihuahua, México. Correo electrónico: arodriguez@colech.edu.mx

---

La visión de la sustentabilidad energética se presenta por la urgencia de conservar el equilibrio en el planeta Tierra, la cual tiene como meta cubrir las necesidades de la población ocasionando el menor impacto sobre los sistemas sociales y ecológicos. Esto viene desde la década de los setenta, incentivando la colaboración entre las naciones en busca de que toda la población sea considerada y con ello apoyar a los países con desventajas sociales y económicas.

De esta necesidad de colaboración se logra la firma del Acuerdo de París, el 12 de diciembre de 2015 con las grandes expectativas de contar con Estados Unidos y Chi-

na —los principales emisores de gases de efecto invernadero (GEI)— y un total de 195 países firmantes, destacando cuatro elementos clave: 1) la mitigación; 2) la adaptación; 3) el financiamiento; y 4) la diferenciación entre los países desarrollados y en desarrollo, todo esto con un plan a largo plazo de mantener el incremento de la temperatura global en menos de 2 °C, con la esperanza de llegar solamente a los 1.5 °C (Bugada, 2016).

Además, el 25 de septiembre de 2015 la Asamblea General de las Naciones Unidas adopta la Agenda 2030, reconociendo como mayor desafío la eliminación de la pobreza para lograr un desarrollo sostenible, estableciendo para ello 17 Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) con 169 metas (ONU, 2015, 2018). Sus áreas temáticas incluyen las personas, el planeta, la prosperidad, la paz y la asociación, considerando la colaboración internacional y el principio de responsabilidades comunes pero diferenciadas (Martens y Obenland, 2017).

Ocho años han pasado desde que el mundo se unió y logró llegar a estos acuerdos. Durante ese tiempo han cambiado los gobiernos, el planeta Tierra ha empezado a enfrentar los cambios en los patrones de los eventos climáticos extremos y como población sufrimos una crisis sanitaria mundial con la pandemia del COVID-19, ocasionando que durante el 2020 y 2021 tuviéramos diferentes hábitos de movilidad y una disminución del contacto con otros grupos de personas, apoyándonos en gran medida en la tecnología y los recursos digitales.

Todo esto nos ha llevado a entender que para abordar una problemática que involucre el ambiente y a la sociedad se requiere de un acercamiento multi- e interdisciplinario que considere el avance tecnológico, y también es necesaria una reflexión crítica sobre sus implicaciones socioambientales, sobre todo cuando se habla de un tema como la *energía*, que juega un papel importante dentro de lo económico, social y ambiental y que los efectos de su uso transitan de lo global a lo regional y local.

Con esto en mente, en este libro se busca conjuntar tanto conocimiento basado en las ciencias exactas (ciencia básica y aplicada) como

reflexiones desde lo social que conjuguen un diálogo entre las ciencias considerando como ejes transversales la energía y la Agenda 2030 en México.

## **La Agenda 2030**

Como se mencionó previamente, en 2015 la ONU aprobó la Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible con el fin de que los países miembros y sus sociedades emprendieran un nuevo camino con el que se logre mejorar la calidad de vida de todas las personas sin dejar a nadie atrás (ONU, 2023b). La Agenda 2030 cuenta con 17 Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), que establecen que la erradicación de la pobreza (ODS 1: Fin de la pobreza) debe ir de la mano de estrategias que fomenten el crecimiento económico mediante empleos dignos (ODS 8: Trabajo decente y crecimiento económico; ODS 10: Reducción de las desigualdades) y aborden una serie de necesidades sociales como la educación (ODS 4: Educación de calidad), la sanidad (ODS 3: Salud y bienestar) y la protección social (ODS 2: Hambre cero; ODS 5: Igualdad de género), al tiempo que se combate el cambio climático (ODS 13: Acción por el clima) y se protege el medioambiente (ODS 14: Vida marina) y los recursos naturales (ODS 6: Agua limpia y saneamiento; ODS 7: Energía asequible y no contaminante). Lo anterior, para lograr un equilibrio social que permita un desarrollo sostenible (ODS 11: Ciudades y comunidades sostenibles) mediante la producción y consumo responsable (ODS 12), para lograr paz, justicia e instituciones sólidas (ODS 16) considerando alianzas entre los países para obtener los objetivos deseados (ODS 17).

## **La sustentabilidad energética en México**

Los términos *sustentabilidad* y *sostenibilidad* no tienen distinción. Según la Real Academia Española, la *sostenibilidad* es un sinónimo de la *sustentabilidad* y también es la segunda acepción del término *sustentabi-*

lidad (RAE, 2023), por lo que, a lo largo del contenido del presente libro, el lector encontrará ambos términos.

De lo antes descrito, el desarrollo sustentable es hacer un uso correcto de los recursos actuales sin comprometer los de las generaciones futuras. Esto significa que los procesos sustentables preservan, protegen y conservan los recursos naturales actuales y futuros. Algunos principios de la sustentabilidad, según Daly (1978) son:

- Los recursos renovables no deberán utilizarse a un ritmo superior al de su generación.
- Las sustancias contaminantes no podrán producirse a un ritmo superior al que pueda ser reciclado, neutralizado o absorbido por el medioambiente.
- Ningún recurso no renovable deberá aprovecharse a mayor velocidad de la necesaria para sustituirlo por un recurso renovable utilizado de manera sostenible.

Con base en estos principios se puede establecer que la relación entre el crecimiento de las actividades humanas (que implican el consumo de los recursos naturales), la resiliencia del ecosistema y las acciones para renovar los recursos naturales o las acciones efectuadas para mitigar los efectos contaminantes determinarán si un proceso es sustentable o si, por el contrario, contribuye al deterioro ambiental.

La sostenibilidad es un concepto que se aplicó por primera vez en 1987 en el Informe Brundtland (ONU, 1987), y se refiere a la búsqueda de un avance social y económico que asegure a los seres humanos una vida sana y productiva, pero que no comprometa la capacidad de las generaciones futuras de satisfacer sus propias necesidades. A partir de la importancia mundial de los recursos naturales y de la necesidad de su uso racional bajo los principios de Daly (1978), la sostenibilidad busca un desarrollo social que contribuya a mejorar la calidad de vida, salud, educación y cultura de todas las personas.

La mejor forma de entender la sostenibilidad y su importancia son los 17 ODS de la Agenda 2030. Estos tienen una visión global y comprenden desde la búsqueda de la eliminación de la pobreza y de las desigualdades, hasta una educación de calidad, evitar la degradación ambiental y establecer los caminos que lleven a un mundo más próspero, con paz y justicia. Por lo tanto, la sostenibilidad contempla todos los procesos humanos (sociales, educativos, culturales, económicos, etcétera) que en un ambiente de equidad y globalidad pretenden el desarrollo y bienestar equitativo de las personas cuidando el ambiente.

## Potencial de energías renovables en México

---

Fatih Birol, actual director ejecutivo de la Agencia Internacional de la Energía (AIE), ha mencionado que “la industria del petróleo y el gas se enfrenta al momento de la verdad en la COP28 en Dubái. Mientras el mundo sufre los impactos de una crisis climática que empeora, continuar con las cosas como siempre no es ni social ni ambientalmente responsable” (IEA, 2023).

La AIE ha puesto de manifiesto que las energías fósiles (gas y petróleo) se enfrentan a los avances tecnológicos de las energías renovables, por lo que deberán adoptar un enfoque más responsable y contribuir de manera positiva a la nueva economía energética y a la crisis climática que cada vez empeora (IEA, 2023). Incluso, en las condiciones políticas actuales, la demanda mundial de petróleo y gas alcanzará su punto máximo en el 2030 (IEA, 2023). Además, la AIE establece que una acción más fuerte para abordar el cambio climático significaría claras caídas en la demanda de ambos combustibles. Si los gobiernos cumplen plenamente sus compromisos nacionales en materia de energía y clima, se estima que la demanda tendría una caída de 45 % sobre el nivel actual para el 2050. Y, para alcanzar emisiones netas equivalentes a cero —lo cual es necesario para mantener el objetivo de limitar el calentamiento global—, el

uso de petróleo y gas deberá presentar una reducción de 75 % para 2050 (IEA, 2023).

En este contexto, en el marco de los Objetivos de Desarrollo Sostenible, en particular el ODS 7, México ha encaminado esfuerzos para reducir el efecto del calentamiento global, con una visión de aumentar la participación de las energías renovables para el 2030. Según los datos reportados por la Secretaría de Energía (Sener, 2022), al cierre del 2021 la producción de hidrocarburos reportó una participación de 55.15 %, la de gas natural 22.26 %, carbón 1.94 %, nuclear 1.76 %, condensados 4.15 % y energías renovables 14.15 % (IEA, 2023; Sener, 2022).

Respecto al consumo por sectores, el transporte encabeza la lista con 55.07 %, seguido por el sector industrial con 22.79 %, residencial con 15.75 %, agropecuario con 3.53 % y el comercial y de servicios con 2.85 % (IEA, 2023; Sener, 2022). En cuanto a las energías renovables, de ese 14.15 % la industria hidroeléctrica representa 4.22 %, la biomasa (principalmente leña) 3.27 %, la energía solar (fotovoltaica) 2.63 %, energía eólica con 2.42 %, la energía geotérmica 1.31 % y otros con 0.3 % (IEA, 2023; Sener, 2022).

En cuanto al índice de independencia energética (IIE, valor que mide el grado en que un país cubre su demanda energética a partir de su producción y se obtiene de la razón entre la producción de energía primaria y el consumo total energético para un mismo periodo, por lo que un valor de IIE <1 hace referencia a una dependencia energética, un IIE = 1 representa un equilibrio en la producción/consumo energético y un IIE >1 indica el grado de un país con independencia energética), México cerró el 2022 con un IIE de 0.71, es decir, la energía primaria cubrió el 71 % de la demanda energética y el déficit (0.29) fue cubierto con importaciones (Sener, 2022). Este escenario pone de manifiesto la necesidad de continuar realizando esfuerzos a nivel gobierno para impulsar las energías renovables a fin de alcanzar el compromiso con la Agenda 2030.

## El diálogo entre las ciencias para lograr los ODS de la Agenda 2030

---

Como ya se ha mencionado, cuando hablamos de la Agenda 2030 es necesario destacar que reconoce como mayor desafío la erradicación de la pobreza (ONU, 2015), colocándolo antes de lo económico y ambiental, poniendo sobre la mesa la consideración de los grupos vulnerables, dejando claro que el aspecto social es importante en cualquiera de los ODS que se aborden, como el ODS 7 (garantizar el acceso a una energía asequible, segura, sostenible y moderna), en donde en el *Informe de los ODS: Edición especial*, acepta que al estar a medio camino de su cumplimiento se ha avanzado pero no lo suficiente, reconociendo que a este ritmo para el 2030 “alrededor de 660 millones de personas continuarán sin acceso a la energía eléctrica y casi 2 000 millones de personas seguirán dependiendo de combustibles fósiles y tecnologías contaminantes para cocinar” (ONU, 2023a, p. 4).

Respecto a la transición energética se informa que, aunque se tiene un avance, este no ha sido suficiente sobre todo para los sistemas de calefacción y transporte (ONU, 2023a). En este sentido, además de las inversiones y programas de gobierno adecuados a las necesidades locales, es necesario lograr una transición socioenergética, donde se requiere de mayores estudios académicos que consideren, entre otras cosas, los hábitos de consumo y los posibles conflictos socioambientales, así como el factor humano en los procesos energéticos (Ariztía et al., 2017).

Además, para la implementación de soluciones sociotécnicas a fin de poder disminuir el uso de combustibles y tecnologías contaminantes para cocinar o para el uso de energías renovables en los sistemas de riego, o simplemente la transición en el hogar a tecnologías que ayuden en el confort térmico, es necesario —además de lo técnico— considerar lo social, como los modos de vida, la cultura e identidad que definen las acciones y formas de aceptar una nueva tecnología (Kreimer, 2017).

Las condiciones actuales exhortan a la academia a ampliar su forma de análisis, tratamiento y objetivos finales de las investigaciones, donde es urgente la colaboración entre las ciencias de aplicación básica y desarrollo tecnológico con las ciencias humanas y sociales, con el fin de que lo que se hace en el laboratorio y desde la teoría considere las necesidades, percepciones y hábitos, así como los aspectos culturales, tradicionales, religiosos y de identidad, entre los tantos factores que afectan la forma de uso de una innovación tecnológica, esto sin perder las peculiaridades y pluralidades de lo regional y local.

## Estructura y objetivo del libro

---

Una forma de llegar al diálogo entre las ciencias es compartir el conocimiento y estrategias de trabajo desde los enfoques de cada experta y experto a partir de su experiencia y disciplina. Por ello, en este libro se buscó a investigadores de las ciencias exactas y sociales que, desde su enfoque, compartieran sus avances, resultados y reflexiones sobre la energía en México y la Agenda 2030, que, además, es un tema prioritario de la Red SUMAS (Sustentabilidad Energética, Medio Ambiente y Sociedad, número de proyecto 271624, una red mexicana creada en el 2016 con fondos del Consejo Nacional de Humanidades, Ciencias y Tecnologías [Conahcyt]) que tiene por objetivo el análisis de las implicaciones de las políticas públicas y prospectivas del sistema energético mexicano hacia un desarrollo sustentable para contribuir en la formación de recursos humanos y la integración de institutos de educación superior (IES) y centros de investigación (CI), públicos y privados, nacionales e internacionales, en proyectos en materia de sustentabilidad energética, medioambiente y sociedad.

Con ello, se logró una pluralidad de contenidos que incluyen distintas estructuras y formas de escritura, confrontando el primer reto: el formato de los capítulos, ya que en las ciencias exactas se utiliza en mayor medida la estructura de artículo de investigación (introducción, me-

metodología, resultados y discusiones), mientras que en las ciencias sociales es más común el ensayo (introducción, desarrollo del tema y conclusiones), por lo que optamos por otorgar a los autores las dos opciones con el fin de que cada uno desarrollara su capítulo con la estructura en la que mejor pudiera presentar sus resultados o reflexiones, llegando al segundo reto: el enfoque del documento.

Abordar un problema complejo como es la energía requiere de diversos niveles de análisis, comprensión y reflexión, por lo que se buscaron trabajos que pudieran ser revisiones de literatura, reflexiones teóricas, proyectos aplicados, pruebas experimentales, estudios teóricos y/o de modelación, trabajo de campo y/o estudios de caso, con el fin de obtener una mirada de lo que se ha realizado de manera local, pero con implicación nacional en la Agenda 2030.

Con base en lo descrito anteriormente, el objetivo de la presente obra es contribuir al conocimiento del estado actual de la energía, ambiente y sociedad en México con respecto a la Agenda 2030, ya sea desde el análisis teórico, práctico, experimental, de modelación o aplicado. Por lo anterior, los ejes transversales de los capítulos comprendieron la Agenda 2030 y la energía, desde sus diversas vertientes.

Una característica que se buscó fue la de tener tanto capítulos de investigaciones realizadas como reflexiones sobre situaciones locales y regionales, generando dos grandes partes (en ambas se tienen capítulos con estructura de artículo y ensayo):

Parte I. Aplicaciones en México de las energías renovables: Aquí se presentan resultados de modelación, laboratorio y trabajo en campo de distintos elementos de mejora de las energías renovables, así como ensayos y revisiones de literatura sobre posibles aplicaciones tecnológicas que contribuyan a implementar el ODS 7: Garantizar el acceso a una energía asequible, segura, sostenible y moderna.

Parte II. Reflexiones sobre la Agenda 2030 y la energía: En esta parte se incluyen problemáticas y tópicos tanto locales como regionales sobre las implicaciones de la energía y la sociedad, desde reflexiones, revisiones de literatura, comparación de datos oficiales y percepciones desde el trabajo de campo.

A continuación, se describe cada uno de los capítulos:

Parte I: Aplicaciones en México de las energías renovables.

*Capítulo 1.* Modelación geoquímica y térmica de sistemas geotérmicos cortical y marino. Nos habla de la importancia de la modelación geoquímica de yacimientos geotérmicos con miras a mejorar en el corto plazo el uso de herramientas geotermométricas (basadas en las concentraciones de solutos como el Na, K, Ca y Mg) para reducir la incertidumbre en la estimación de la temperatura de un yacimiento geotérmico. También describe la importancia de la modelación térmica de sistemas geotérmicos de ciclo cerrado para aprovechar el gran potencial geotérmico (con presencia de anomalías de flujo de calor) actualmente disponible en cuencas marinas, como es el caso del Golfo de California.

*Capítulo 2.* Escenarios de desarrollo sostenible en una zona de exploración geotérmica y un campo geotermoeléctrico en Puebla, México. Presenta un estudio sobre la evaluación integral de la energía geotermoeléctrica desde una perspectiva de *desarrollo sostenible* a meso- y microescala, el cual incluye evaluaciones de calidad ambiental, social y económica en la zona de exploración de Acoculco y en el campo geotérmico Los Humeros (ambas zonas localizadas en el estado de Puebla), identificando áreas de oportunidad para promover el uso de evaluaciones de estrategias ambientales con el propósito de determinar con mayor rigor los impactos generados por los proyectos geotermoeléctricos.

*Capítulo 3.* Nanofluidos para el mejor aprovechamiento térmico de la energía solar. Presenta una discusión sobre los esfuerzos de la comunidad científica para mejorar la eficiencia térmica de nanofluidos utilizados

como fluidos de trabajo en colectores solares para el aprovechamiento de la energía solar a través de colectores solares, haciendo énfasis en el impacto que tendrá en el futuro el uso de colectores solares de absorción directa, en la cual los nanofluidos jugarán un rol importante para alcanzar mejor eficiencia en estas tecnologías.

*Capítulo 4.* Sustentabilidad energética con tecnologías de almacenamiento electroquímico. Presenta una discusión acerca de las tecnologías de almacenamiento electroquímico de energía, como clave para el uso eficiente de la energía y su potencial para el desarrollo de nuevas tecnologías de energía y electromovilidad y muestra una paleta de la clasificación de tipos de baterías como marco de referencia en la toma de decisiones en el diseño y desarrollo de sistemas energéticos sustentables.

*Capítulo 5.* Importancia socioambiental de la biomasa forestal en comunidades rurales: ejido La Reforma, municipio de Palenque, Chiapas. Presenta un estudio en el que se describen las características ambientales, sociales y económicas del ejido La Reforma para conocer sus necesidades energéticas y caracterizar las propiedades físico-químicas y el potencial energético de la leña (biomasa forestal) para ser utilizada como una solución sustentable en la demanda energética de la comunidad rural.

*Capítulo 6.* Sistemas para una producción agrícola sustentable basada en energías renovables: caso de estudio en Valles Centrales, Oaxaca. Se presentan los resultados del diseño, instalación y operación de unidades demostrativas de riego eficiente impulsadas con energía renovable (solar fotovoltaica) para incrementar la producción agrícola de manera sostenible y sustentable en la comunidad de Valles Centrales, Oaxaca, catalogada con un índice de marginación y rezago social alto.

Parte II: Reflexiones sobre la Agenda 2030 y la energía.

*Capítulo 7.* Retos para una transición socioenergética: caso Chihuahua, México. Presenta un análisis de los aspectos técnicos y sociales de las investigaciones realizadas sobre energía en el estado de

Chihuahua, México, considerando que es necesario incrementar los grupos multidisciplinarios para lograr proyectos con aplicación en la sociedad. Los principales temas identificados fueron el confort térmico en los hogares y el uso de sistemas fotovoltaicos para el riego agrícola y la biomasa de manzana como biocombustible, en los cuales se considera necesario que promuevan una transición socioenergética.

*Capítulo 8.* La permisividad de lo ilegal: exclusión social por pobreza energética en zonas marginales en Ciudad Juárez, México. En esta aportación se presenta una de las aristas de la pobreza energética desde el acceso a la energía eléctrica de manera ilegal en una zona con marginalidad en Ciudad Juárez, además de una reflexión sobre la dificultad de cumplir con las metas del ODS 7 de la Agenda 2030 cuando no se ha transitado de manera apropiada hacia la modernidad. Desde la etnografía identifica la complicidad Estado-ciudadano para no llegar a lo legal, ocasionando que aunque se tenga acceso a la energía eléctrica, este no sea de una manera segura.

*Capítulo 9.* La democracia energética en México. Una tarea pendiente. Nos habla del concepto de democracia energética y la forma en que desde la legislación mexicana es visto el ciudadano y grupos de la sociedad civil para poder aplicarlo a proyectos energéticos. Aunque es un concepto nuevo, los autores identifican dentro de sus elementos esenciales el rol de los grupos mencionados, tanto como consumidores, productores y participantes activos, en la toma de decisiones.

*Capítulo 10.* Consumo de energía en el sector residencial, eficiencia energética y opciones de mitigación de gases de efecto invernadero. Este capítulo resalta la complejidad de la energía en el sector residencial en México, ya que cada región presenta diversas particularidades. Por otro lado, identifica que la demanda de energía térmica es mayor a la eléctrica, por lo que la promoción de la eficiencia energética debe dirigirse principalmente a las actividades dependientes de este tipo de energía en las viviendas.

## Aportaciones del libro

---

Este libro aborda de una manera general la visión actual en México de áreas prioritarias para impulsar la sustentabilidad energética, el medioambiente y la sociedad de nuestro país rumbo a la Agenda 2030. La aportación principal es la manera de aplicar la multi- e interdisciplina para visualizar el tema de la energía, lográndolo al presentar distintas voces sobre lo que se hace en México desde las perspectivas metodológicas de cada autora y autor, con trabajos de modelación, de laboratorio, aplicación en campo en comunidades aisladas, así como revisiones y reflexiones del avance o situaciones específicas de la Agenda 2030 en relación con la energía.

Aunque se destacan los avances, también sobresalen los retos que se tienen para lograr los objetivos de la Agenda 2030 desde lo gubernamental, social y académico, y se visualiza la necesidad de conformar grupos de colaboración para poder atender las problemáticas identificadas. Se requiere de una mayor comunicación entre las partes y las diversas disciplinas, por ello, con este libro se busca contribuir y generar las interacciones desde los tipos de escritura y lenguajes que se trataron de unificar con el fin de exponer sus nociones socioenergéticas.

Todo esto en concordancia con el Programa Nacional Estratégico de Energía y Cambio Climático, el cual “busca promover una reflexión amplia y acciones específicas para alcanzar un sistema energético sostenible y más equitativo” (Conahcyt, 2023) desde la interdisciplina, considerando todos los procesos desde la generación hasta el uso final promoviendo la democratización de la energía, aspectos que se reflexionan en esta lectura a lo largo de los diversos capítulos.

## REFERENCIAS

- Ariztía, T., Boso, A., y Tironi, M. (2017). Sociología de la energía. Hacia una agenda de investigación. *Revista Internacional de Sociología*, 75(4), 1-7. <http://dx.doi.org/10.3989/ris.2017.75.4.17.07>
- Bugeda, B. (2016). “Así está decidido”. El Acuerdo de París de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático. En J. C. Rueda, C. Gay y F. Quintana (Coords.), *21 visiones de la COP21. El Acuerdo de París: Retos y áreas de oportunidad para su implementación en México* (pp. 31-41). UNAM-PINCC.
- Consejo Nacional de Humanidades, Ciencias y Tecnologías. (2023). *Energía y cambio climático*. Programas Nacionales Estratégicos. Conahcyt. <https://conahcyt.mx/pronaces/pronaces-energia-y-cambio-climatico/>
- Daly, H. (1978). On thinking about energy in the future. *Natural Resources Forum*, 3(1), 19-26. <https://doi.org/10.1111/j.1477-8947.1978.tb00389.x>
- International Energy Agency. (2023, 28 de noviembre). *Oil and gas industry faces moment of truth –and opportunity to adapt– as clean energy transitions advance*. IEA. <https://www.iea.org/news/oil-and-gas-industry-faces-moment-of-truth-and-opportunity-to-adapt-as-clean-energy-transitions-advance>
- Kreimer, P. (2017). Los estudios sociales de la ciencia y la tecnología: ¿son parte de las ciencias sociales? *Teknokultura*, 14(1), 143-162. <https://doi.org/10.5209/TEKN.55727>
- Martens, J., y Obenland, W. (2017). La Agenda 2030. El nuevo consenso mundial sobre desarrollo. En A. Chanona (Coord.), *De los Objetivos del Milenio a los Objetivos de Desarrollo Sostenible: nuevos enfoques* (pp. 75-94). UNAM, La Biblioteca y FES Transformación.

Naciones Unidas. (1987). *Informe de la Comisión Mundial sobre el Medio Ambiente y el Desarrollo*. Desarrollo y cooperación económica internacional: medio ambiente. ONU.

Naciones Unidas. (2015). *La Asamblea General adopta la Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible*. ONU. <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/2015/09/la-asamblea-general-adopta-la-agenda-2030-para-el-desarrollo-sostenible/>

Naciones Unidas. (2018). *La Agenda 2030 y los Objetivos de Desarrollo Sostenible: una oportunidad para América Latina y el Caribe*. ONU. <https://repositorio.cepal.org/server/api/core/bitstreams/cb30a4de-7d87-4e79-8e7a-ad5279038718/content>

Naciones Unidas. (2023a). *Informe de los Objetivos de Desarrollo Sostenible. Edición Especial*. ONU. [https://unstats.un.org/sdgs/report/2023/The-Sustainable-Development-Goals-Report-2023\\_Spanish.pdf?\\_gl=1\\*8nuhhw\\*\\_ga\\*NTc2NTE4MzU4LjE2Njl2Njk1OTM.\\*\\_ga\\_TK9BQL5X7Z\\*MT-cwMDY4NjYyNS4xMi4xLjE3MDA2ODY5NzQuMC4wLjA](https://unstats.un.org/sdgs/report/2023/The-Sustainable-Development-Goals-Report-2023_Spanish.pdf?_gl=1*8nuhhw*_ga*NTc2NTE4MzU4LjE2Njl2Njk1OTM.*_ga_TK9BQL5X7Z*MT-cwMDY4NjYyNS4xMi4xLjE3MDA2ODY5NzQuMC4wLjA)

Naciones Unidas. (2023b, 25 de octubre). *Objetivos de Desarrollo Sostenible*. Centro Regional de Información. ONU. <https://unric.org/es/agenda-2030/>

Real Academia Española. (2023, 25 de octubre). *Diccionario de la Lengua Española*. RAE. <https://www.rae.es/>

Secretaría de Energía. (2022). *Balance Nacional de Energía 2022*. Sener. <https://base.energia.gob.mx/BNE/BalanceNacionalDeEnerg%C3%ADa2022.pdf>



# PARTE I

· APLICACIONES EN MÉXICO  
· DE LAS ENERGÍAS RENOVABLES

# CAPÍTULO 1.

## MODELACIÓN GEOQUÍMICA Y TÉRMICA DE SISTEMAS GEOTÉRMICOS CORTICAL Y MARINO

**Efraín Gómez Arias\***

Investigador por México, Conahcyt–Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, Baja California. Ensenada, Baja California, México, 22860.

\*gomezar@cicese.mx

---

### Resumen

**E**l presente capítulo muestra los resultados de dos estudios realizados sobre la modelación geoquímica y térmica de sistemas geotérmicos. En el primero se aborda la geoquímica del yacimiento Las Tres Vírgenes, Baja California Sur, donde se modeló la distribución espacial de los principales cationes mayores  $\text{Na}^+$  y  $\text{K}^+$  presentes en el fluido geotérmico a condiciones de yacimiento a partir de los procesos de interacción fluido-roca y la alteración hidrotermal. Los resultados muestran una buena correlación respecto a la composición química de los fluidos de cabezal de pozos de extracción del campo geotérmico. El segundo estudio muestra los resultados de la estimación y evaluación del potencial geotérmico disponible

en la cuenca de Wagner, al norte del Golfo de California, mediante el uso de sistemas geotérmicos de ciclo cerrado en fondo marino.

Palabras clave: **Energía geotérmica; modelación geoquímica; transferencia de calor; sistemas geotérmicos de ciclo cerrado.**

---

### **Abstract**

This chapter presents the results of two studies on geothermal systems geochemical and thermal modeling. The first study deals with the geochemistry of the Las Tres Virgenes geothermal reservoir, Baja California Sur, where the spatial distribution of the main Na<sup>+</sup> and K<sup>+</sup> cations present in the geothermal fluid under reservoir conditions was modeled based on the fluid-rock interaction processes and of the hydrothermal alteration documented in the study area. The results show a good correlation between the simulated cation concentrations field models and the chemical composition of wellhead fluids extracted from the geothermal field. The second study shows the results of estimating and evaluating the geothermal potential available in the Wagner basin in the northern Gulf of California through closed-cycle geothermal systems on the seabed.

Keywords: **Geothermal energy; geochemical modeling; heat transfer; close loop geothermal system.**

## Introducción

---

En la última década, la energía geotérmica ha sido una alternativa para hacer frente al uso de los combustibles fósiles debido a que es una fuente de energía renovable y limpia, cuya emisión de gases de efecto invernadero (emisiones de CO<sub>2</sub>) es baja ya que el 99 % de las emanaciones de la industria geotérmica a la atmósfera es vapor de agua, lo cual cobra relevancia en la actualidad, en un contexto de cambio climático y la Agenda 2030 en México y el mundo. Las centrales geotérmicas para la generación de electricidad son altamente rentables, las cuales operan los 365 días del año, siempre y cuando no se sobreexplota este recurso natural, es decir, que exista un equilibrio entre la extracción y la reinyección del fluido hidrotermal durante la etapa de producción de energía geotérmica. Adicionalmente, presenta otras ventajas con respecto a fuentes como las eólicas y solares, dado que las plantas geotérmicas tienen un bajo costo de mantenimiento y operación, además de no ser afectadas por factores climáticos.

En México se ha utilizado la energía geotérmica desde 1959, cuando entró en operación el campo geotérmico de Pathé, Hidalgo, cuya capacidad fue de 3.5 MW. A pesar de que el campo se mantuvo en funcionamiento durante 14 años (hasta 1973, debido a problemas en la extracción del fluido hidrotermal), demostró la viabilidad de aprovechar el recurso geotérmico disponible en México (Hiriart et al., 2011, p. 167; DiPippo, 2022). A partir de entonces, se han desarrollado diferentes proyectos para evaluar y aprovechar el recurso geotérmico, así como diversas técnicas para la exploración, localización y extracción de fluidos hidrotermales.

Para diciembre de 2019, la capacidad total instalada en México era de 1 005.8 MW (947.8 MW en operación) (Romo-Jones et al., 2020, 2022) distribuidos en cinco campos geotérmicos, cuatro operados por la Comisión Federal de Electricidad (CFE): Cerro Prieto, Baja California,

con una capacidad de 570 MW; Los Humeros, Puebla, con 119.8 MW; Los Azufres, Michoacán, con 270.5 MW y Las Tres Vírgenes, Baja California Sur, con 10 MW. El quinto campo es operado por la compañía privada Grupo Dragón, en Domo San Pedro, Nayarit, con 35.5 MW (Gutiérrez-Negrín et al., 2020).

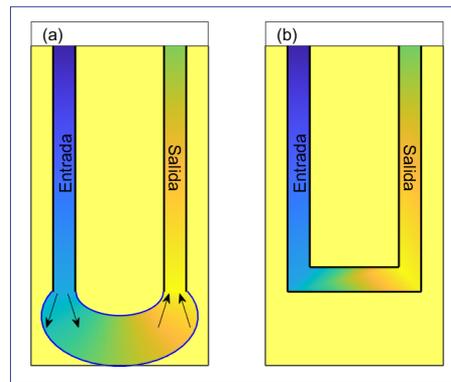
La investigación de recursos geotérmicos requiere la integración de estudios geoquímicos, geológicos (incluyendo modelos hidrogeológicos) y geofísicos, con el fin de obtener modelos conceptuales del sistema que permitan identificar la fuente de calor, tipos de fluido, permeabilidad y su potencial energético. En este sentido, los estudios geoquímicos, tanto en la exploración como en la explotación de campos geotérmicos, son herramientas fundamentales que proporcionan información sobre las condiciones existentes en el yacimiento, tales como el origen y la evolución de los fluidos, la interacción agua-roca, los procesos de recarga del reservorio y la estimación de temperaturas a profundidad.

Las técnicas se basan principalmente en el análisis de la composición química del agua, gases, así como las relaciones de los isótopos estables en las fases líquida y gaseosa de los fluidos geotérmicos. Así, por ejemplo, las concentraciones de los principales iones y cationes (Na, K, Mg y Ca) disueltos en el agua y la composición de las rocas son geoindicadores que permiten inferir las condiciones de equilibrio de la interacción fluido-roca, que a su vez permitirán estudiar las reacciones químicas involucradas en la formación y disolución de los minerales que se encuentran en los sistemas geotérmicos (D'amore y Panichi, 1985; Giggenbach, 1988).

Los recursos hidrotermales se pueden clasificar en tres categorías dependiendo de su temperatura: sistemas de baja temperatura (<90 °C), de temperatura media (90-150 °C) y alta temperatura (>150 °C). Se considera que los sistemas de alta temperatura son los más apropiados para la generación de energía eléctrica.

Para el caso de los sistemas geotérmicos de mediana a alta temperatura con baja o nula saturación de fluidos, se tienen dos formas para aprovechar el recurso geotérmico. La primera involucra a los sistemas geotermiales de ciclo abierto o también conocidos como sistemas geotérmicos mejorados (EGS, por sus siglas en inglés), que consiste en inyectar agua fría al reservorio, la cual fluye y se calienta en los poros y fracturas para posteriormente ser recuperada mediante otro pozo de producción. La segunda forma es el sistema geotermal de ciclo cerrado (SGCC) o circuito cerrado, donde el fluido es inyectado a través de un pozo y circula sin tener contacto directo con el reservorio, entonces el fluido es recuperado en la superficie con mayor temperatura, donde es aprovechado para la generación de energía eléctrica. Las ventajas de este último sistema son que no hay contacto directo entre el fluido inyectado y el reservorio, no hay contaminación del agua del reservorio (en caso de existir) y la permeabilidad del reservorio es despreciable, por lo que el costo de producción se puede ver reducido (Xu et al., 2020).

**FIGURA 1.** Ejemplos de sistemas geotérmicos de ciclo cerrado (a) y abierto (b)



Fuente: Tomado y modificado de López-Villagómez (2022).

Los SGCC se pueden dividir en tres tipos: coaxial, cables múltiples y en forma de U, siendo el más utilizado el coaxial (Xu et al., 2020). Por lo tanto, estos sistemas pueden ser una opción para aprovechar el recurso geotérmico cortical y marino.

En particular, el presente capítulo muestra resultados acerca de: 1) estudios de interacción fluido-roca en el campo geotérmico Las Tres Vírgenes, donde a partir de la modelación numérica en 2D de la ecuación del transporte de solutos se evaluó la distribución espacial de los cationes

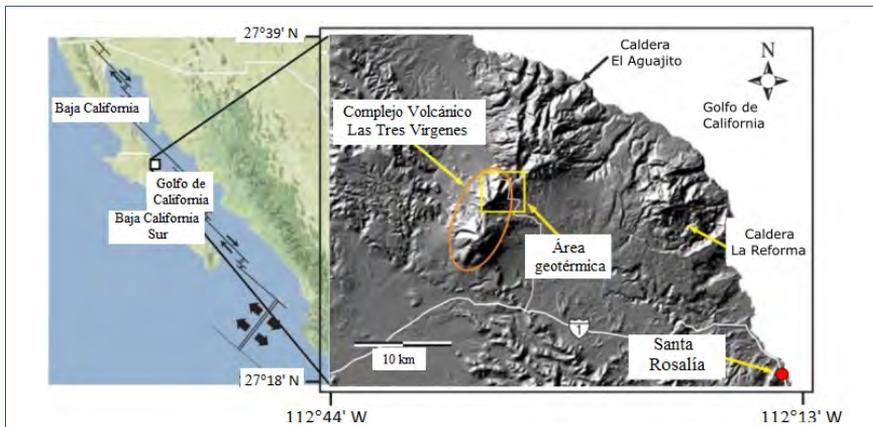
mayores  $\text{Na}^+$  y  $\text{K}^+$  contenidos en el fluido hidrotermal a condiciones de yacimiento para evaluar su correlación con las isotermas de temperaturas del yacimiento obtenidas a partir de registros de pozos geotérmicos en campo; y 2) modelado en 2D de un SGCC en forma de “U” (Figura 1), que consiste en dos pozos verticales unidos por un pozo horizontal en el fondo, para evaluar el potencial geotérmico disponible en el fondo marino de la cuenca de Wagner del Golfo de California.

## Áreas de estudio

### Campo geotérmico Las Tres Vírgenes

El campo geotérmico Las Tres Vírgenes (CGLTV) se localiza en Baja California Sur, a 34 kilómetros de la ciudad de Santa Rosalía (Figura 2). El yacimiento es de líquido dominante, alojado en granodioritas. Actualmente cuenta con una capacidad total instalada y operativa de 10 MW, con dos unidades turbogeneradoras a condensación de 5 MW cada

**FIGURA 2.** Ubicación del Complejo Volcánico Las Tres Vírgenes (CVTV), las calderas La Reforma y El Aguajito y el área geotérmica



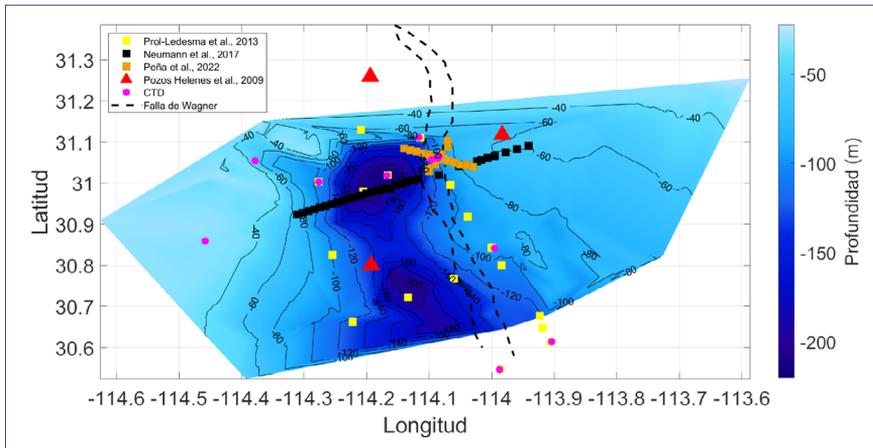
Fuente: Tomado y modificado de Peña-Beltrán (2022).

una. El CGLTV tiene tres pozos de producción y dos pozos de inyección (Sena-Lozoya et al., 2020; Valencia-Cabrera, 2021; Peña-Beltrán, 2022).

### Cuenca de Wagner: Golfo de California

La cuenca de Wagner es de tipo *pull-apart*, ubicada al norte del Golfo de California (Figura 3). Es activa y es la menos profunda de las cuencas al norte del golfo con una profundidad de ~225 m. Está gobernada por la falla de Wagner, que es una falla lítrica con dirección NNW-SSE y es una ramificación de la falla de Cerro Prieto, que se localiza en la zona este de la cuenca. Los datos sísmicos indican que tiene una capa de sedimentos de aproximadamente 7-8 km de espesor (Aragón-Arreola y Martín-Barajas, 2007; Helenes et al., 2009; Vázquez-Figueroa et al., 2009; Neumann et al., 2017).

**FIGURA 3.** Mapa de la zona de estudio que incluye batimetría, colecta de datos de flujos de calor (ProLedesma et al., 2013; Neumann et al., 2017; y Peña-Domínguez et al., 2022), localización de pozos (Pemex), colecta de datos de conductividad, temperatura y profundidad (CTD, por sus siglas en inglés) y en líneas punteadas se muestra la falla de Wagner



Fuente: Tomado y modificado de López-Villagómez (2023).

Los sedimentos de la cuenca de Wagner, así como de la región norte del Golfo de California, provienen del río Colorado que se encuentra al norte. El intervalo de la temperatura superficial del mar en esta zona varía en el transcurso del año, con 8.25 °C en diciembre (mes de invierno más frío) y 32.58 °C en agosto (mes de verano más caliente). La salinidad respectivamente es de 35.28 (partes por mil) en octubre y hasta 41.00 (partes por mil) en julio (López-Villagómez, 2023).

## Metodología

### Registros de temperatura de pozos

En la Tabla 1 se presentan los registros de temperatura de los pozos LV-1, LV-3, LV-4, LV-5, LV-7 y LV-8 tomados de Verma et al. (2006), a partir de los cuales se obtuvo el gradiente geotérmico para el CGLTV. Adicionalmente, estos registros fueron utilizados para validar los campos de temperaturas obtenidos a partir de los diferentes campos de velocidades desarrollados y así escoger el modelo que más se acerque a las temperaturas reportadas para el CGLTV.

**TABLA 1.** *Registros de temperatura para los pozos LV-1, LV-3, LV-4, LV-5, LV-7 Y LV-8*

Profundidad lineal (m)	Temperatura (°C)	Profundidad lineal (m)	Temperatura (°C)	Profundidad lineal (m)	Temperatura (°C)
<b>Pozo 1 (LV1)</b>		<b>Pozo 3 (LV3)</b>		<b>Pozo 4 (LV4)</b>	
110	101	570	109	800	196
110	100	580	118	900	207
250	121	920	125.5	1 085	217
500	152	1 202	230	1 175	222
600	165	1 647	232	1 280	242
700	177	1 830	261	1 540	243
1 057	231	1 940	247	2 367	290
1 150	243	1 940	243		
1 325	225	2 000	262		
1 500	223	2 150	261		

Profundidad lineal (m)	Temperatura (°C)	Profundidad lineal (m)	Temperatura (°C)	Profundidad lineal (m)	Temperatura (°C)
<b>Pozo 5 (LV5)</b>		<b>Pozo 7 (LV7)</b>		<b>Pozo 8 (LV8)</b>	
405	150	1 098	215	399	157
498	168	1 203	227	500	160
606	185	1 250	211	598	180
706	194			700	169
895	216			890	191
895	194			985	207
1 182	244				
1 272	248				
1 745	270				

Fuente: Datos reportados por Verma et al. (2006).

### Química del yacimiento

En este estudio se utilizó la información reportada por Valencia-Cabrera (2021) de los datos de la composición química del agua geotérmica a condiciones de yacimiento para 24 muestras provenientes de los pozos LV-1, LV-3, LV-4, LV5, LV-6, LV-8, LV-11 y LV-13, la cual presenta también el balance catiónico para cada especie, que se basa en el análisis de la diferencia porcentual entre las cargas de las principales especies con cargas positivas y negativas (Tabla 2).

### Minerales de alteración

De acuerdo con los diagramas de estabilidad mineral realizados por Valencia-Cabrera (2021), las fases mineralógicas de alteración hidrotermal que están en contacto con el fluido geotérmico corresponden a albita, microclina y zoisita, por lo tanto, estos minerales fueron considerados para el modelado 2D del transporte de solutos.

### Propiedades termodinámicas de minerales

El transporte de solutos ocurre mediante los procesos de advección y de difusión, por lo tanto, para resolver la ecuación de transporte se debe considerar el coeficiente de difusión (D) de cada catión, el cual corres-

**TABLA 2.** Concentración (mg/Kg) de cationes Na<sup>+</sup> y K<sup>+</sup> a condiciones de yacimiento ( $C_R$ ) para el campo geotérmico Las Tres Vírgenes (CGLTV).  $T_{yac}$  es la temperatura a condiciones de yacimiento (°C) y H es entalpia (KJ/kg)

Muestra	Pozo	$T_{yac}$	H	pH	Na-C <sub>R</sub>	K-C <sub>R</sub>
1	1	252	930	6.5	3 487.33	567.22
2	1	252	930	5.6	3 102.76	510.19
3	1	252	930	5.7	3 330.88	597.28
4	1	252	930	5.2	3 293.11	539.48
5	1	252	930	5.9	3 417.96	539.48
6	3	264	1 063	5.9	2 985.02	539.04
7	3	264	1 359	6.1	2 342.28	407.96
8	3	264	1 298	6.8	2 736.62	461.43
9	3	264	1 240	6.5	2 939.35	494.35
10	4	244	1 391	6.6	3 737.35	646.84
11	4	244	1 391	6.2	3 854.38	700.80
12	4	244	1 296	6.6	2 987.59	516.85
13	5	250	1 184	6.9	3 235.22	551.18
14	5	250	828	6.6	4 010.86	634.62
15	5	250	828	6.6	3 996.99	628.10
16	6	260	1 198	6.4	3 090.96	539.21
17	6	260	1 198	6.4	3 057.77	501.27
18	6	260	1 198	6.8	3 174.28	517.53
19	6	260	1 198	6.8	3 141.09	520.92
20	6	260	1 198	6.7	3 226.44	547.34
21	8	240	1 156	6.0	2 402.26	271.55
22	11	240	1 078	6.3	3 596.15	633.00
23	11	240	1 078	6.3	3 727.37	587.58
24	13	270	1 347	6.0	3 145.37	663.62

Fuente: Datos reportados por Valencia-Cabrera (2021).

ponde a una constante proporcional que está en función de la temperatura y es expresada en  $\text{cm}^2/\text{s}$  (Misra, 2012), así como la energía de activación ( $E_a$ ) con base en el pH, la superficie reactiva ( $A$ ) y la constante de reacción ( $\log K$ ) para cada uno de los minerales de alteración (Tabla 3).

**TABLA 3.** Energías de activación ( $E_a$ ), área de superficie reactiva ( $A$ ) y constantes de reacción ( $K$ ) para cada mineral de alteración. <sup>a</sup>Blum y Stillings (1995), <sup>b</sup>Palandri y Kharaka (2004), <sup>c</sup>Helgeson et al. (1984), <sup>1</sup>pH (<5), <sup>2</sup>pH (5-7) y <sup>3</sup>pH (>7)

Mineral	pH	$E_a^a$ (KJ/mol)	$E_a^b$ (KJ/mol)	$\log K^b$ (moles/ $\text{m}^2 \text{ s}$ )	$\log K^c$ (moles/ $\text{m}^2 \text{ s}$ )	$A^c$ ( $\text{cm}^2/\text{g}$ )
Albita	Ácido <sup>1</sup>	60.0 <sup>a</sup>	65.0	-10.16	--	8 300
	Neutro <sup>2</sup>	67.7 <sup>a</sup>	69.0	-12.56	-11.52	
	Básico <sup>3</sup>	50.1 <sup>a</sup>	71.0	-15.60	--	
Feldespato potásico	Ácido <sup>1</sup>	--	51.7	-10.06	-8.65	10 700
	Neutro <sup>2</sup>	38.0 <sup>c</sup>	38.0	-12.41	-11.54	
	Básico <sup>3</sup>	--	94.1	-21.20	--	
Zoisita	Ácido <sup>1</sup>	--	66.1	-7.50	--	6 800
	Neutro <sup>2</sup>	--	66.1	-11.20	--	

Fuente: Datos tomados de Blum y Stillings (1995), Palandri y Kharaka (2004) y Helgeson et al. (1984).

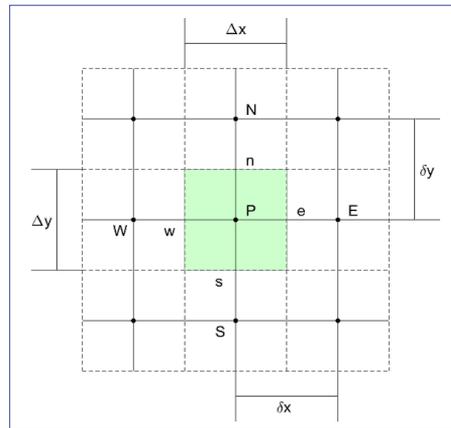
### Modelado térmico

La solución de problemas de mecánica de fluidos (Dinámica de Fluidos Computacional, CFD por sus siglas en inglés) y de transferencia de calor se puede abordar mediante tres métodos: experimentales, teóricos y computacionales. Los métodos experimentales son los que más se aproximan a la realidad, sin embargo, los fenómenos se tienen que reproducir generalmente a escala y el equipo para esto puede ser costoso. El método teórico o analítico suele tener buenos resultados y generalmente se obtiene una fórmula para estos; su problema radica en que los resultados tienden a ser lineales y se tienen que considerar geometrías y la física del fenómeno simples. Los métodos computacionales son los numéricos, estos no cuentan con los problemas de linealidad y geometrías básicas; el problema con este método puede ser el costo computacional (Xamán y Gijón-Rivera, 2016).

Entre los modelos numéricos se tiene el Método de Volumen Finito (MVF, también llamado Método Volumen de Control, MVC). Este método utiliza la integral de las ecuaciones de conservación. Se genera una malla separada en volúmenes de control, cada uno de estos son resueltos mediante la ecuación de conservación. El centro de cada volumen de control tiene un nodo en donde se almacenan los parámetros escalares (densidad, capacidad calorífica, conductividad térmica y concentración); los valores en las paredes de los nodos son los parámetros vectoriales (velocidad y presión). Este método sí es adecuado para mallas con geometrías complejas, es fácil de programar, tiene la ventaja de ser conservativo con las ecuaciones de masa, *momentum* y energía, y solo tiene problemas en el aumento de dimensiones debido a que se tiene que realizar una mayor cantidad de interpolaciones (Xamán y Gijón-Rivera, 2016).

En la malla, para poder distinguir los nodos vecinos primero se identifica un nodo central. En la Figura 4 se identificó este nodo como P. Los nodos vecinos son oeste (W), este (E), norte (N) y sur (S). También se identificaron las orientaciones de las caras (paredes) del nodo, oeste (w), este (e), norte (n) y sur (s).  $\Delta$  se refiere a las distancias entre nodos vecinos y las  $\delta$  son la separación de las paredes del volumen de control.

**FIGURA 4.** Volumen de control. Se puede apreciar el centro del volumen como “P”, las cuatro caras (paredes) del volumen de control en letras minúsculas y los nodos vecinos en letras mayúsculas. Las  $\delta$  representan la distancia entre nodos y  $\Delta$  la longitud de la pared de volumen de control



Fuente: Tomado y modificado de López-Villagómez (2023).

## Ecuaciones gobernantes

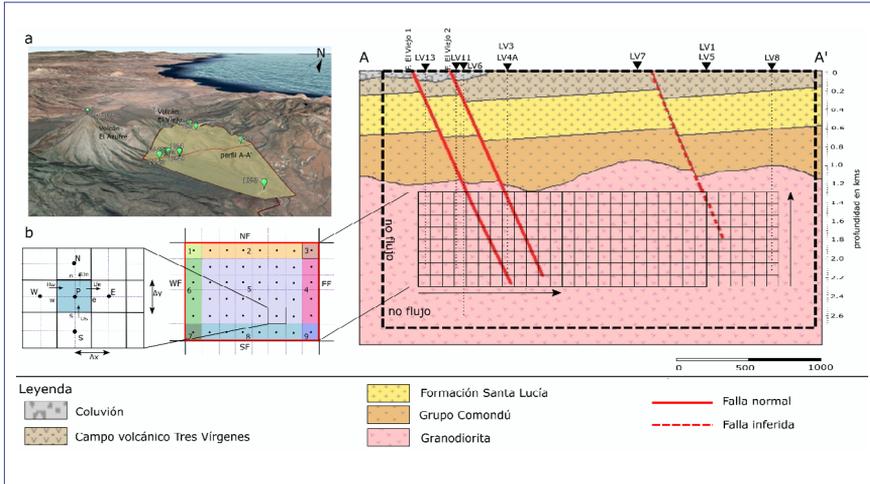
La Tabla 4 muestra las ecuaciones gobernantes de continuidad (conservación de masa), velocidad (momento, el cual corresponde a una ecuación analítica), transferencia de calor (conservación de energía) y el transporte de solutos, con los cuales se estimaron los campos de velocidades, temperaturas y concentraciones ( $\text{Na}^+$  y  $\text{K}^+$ ) en el yacimiento del campo geotérmico Las Tres Vírgenes, así como solo la transferencia de calor en el sistema geotérmico de ciclo cerrado. Una vez discretizadas las ecuaciones de transferencia de calor y transporte de solutos (en estado transitorio) por el MVF o MVC, la solución del sistema de ecuaciones no lineales fue resuelta implementando el algoritmo de Thomas TDMA (algoritmo de matriz tridimensional, por sus siglas en inglés, un método de eliminación gaussiana), el cual permite resolver matrices tridiagonales de forma eficiente (Patankar, 1980; Versteeg y Malalasekera, 2007). Las ecuaciones discretizadas fueron programadas en lenguaje Fortran.

**TABLA 4.** *Ecuaciones gobernantes para la modelación geoquímica y térmica del yacimiento geotérmico Las Tres Vírgenes, así como del sistema geotérmico de ciclo cerrado*

Continuity	$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho u) + \nabla \cdot (\rho v) = 0$	(1)
Velocity (x-y)-analytical solution	$\vec{F}(x, y) = -\frac{y}{\sqrt{x^2 + y^2}} i + \frac{x}{\sqrt{x^2 + y^2}} j$	(2)
Energy conservation	$\begin{aligned} \frac{\rho C_{cp} \partial T}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho u C_{cp} T) + \nabla \cdot (\rho v C_{cp} T) \\ = \nabla \cdot (K_x \nabla T) + \nabla \cdot (K_y \nabla T) + S_h \end{aligned}$	(3)
Advection-diffusion solute transport	$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} [\phi C_k] = \nabla \cdot (\phi D_x \nabla C_k - u C_k) + \nabla \cdot (\phi D_y \nabla C_k - v C_k) \\ + R_{Ck} (T, C_k, \phi) \end{aligned}$	(4)

Fuente: Ecuaciones reportadas por Patankar (1980), Versteeg y Malalasekera (2007) y Xamán y Gijón-Rivera (2016).

**FIGURA 5.** Modelo conceptual del campo geotérmico Las Tres Vírgenes. a) Área (polígono) que comprende el CGLTV y el perfil A-A' muestra la litología del subsuelo a partir de la información de los pozos proyectados sobre el perfil. b) Muestra la malla de discretización utilizada en el Método de Volumen Finito (MVF)



Fuente: Tomado y modificado de Peña-Beltrán (2022).

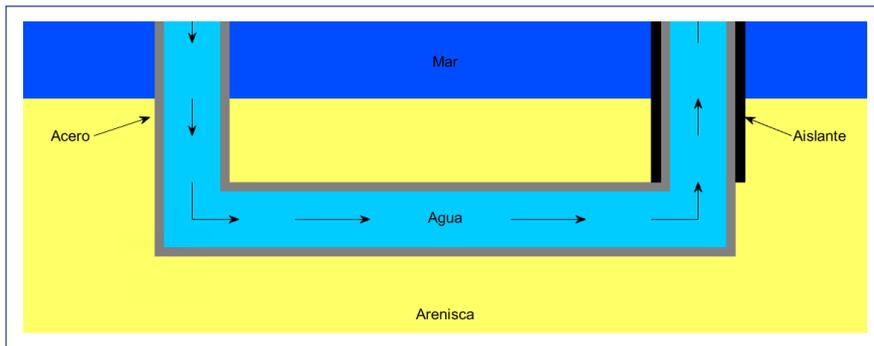
## Modelos conceptuales

La Figura 5 muestra el área total del campo geotérmico, representada por un polígono y la distribución de los pozos geotérmicos. El perfil A-A' (sección para la modelación en 2D) muestra la litología del subsuelo a partir de la información de pozos reportada por Verma et al. (2006). En el modelo conceptual se observa la ubicación de los pozos que se encuentran sobre el perfil trazado, se resalta el área de modelado térmico con una línea negra punteada, así como el área del yacimiento representado por una cuadrícula donde se consideró la convección y la modelación geoquímica.

La Figura 6 muestra el modelo conceptual del SGCC propuesto para la cuenca de Wagner. Para este modelo, el sistema obtiene el calor del subsuelo marino mediante conducción entre el medio (arenisca) y la tubería, y por convección al interior de la tubería del fluido de trabajo

(agua). Para el análisis del sistema, se considera que el medio tiene un intercambio de calor conductivo y el agua dentro de la tubería tiene un intercambio de calor conductivo y convectivo. La profundidad vertical del SGCC fue de 400 m y se varió la longitud horizontal de la tubería 500 m a 1 000 m en intervalos de 100 m cada uno.

**FIGURA 6.** *Modelo conceptual de un sistema geotérmico de ciclo cerrado en la cuenca de Wagner*



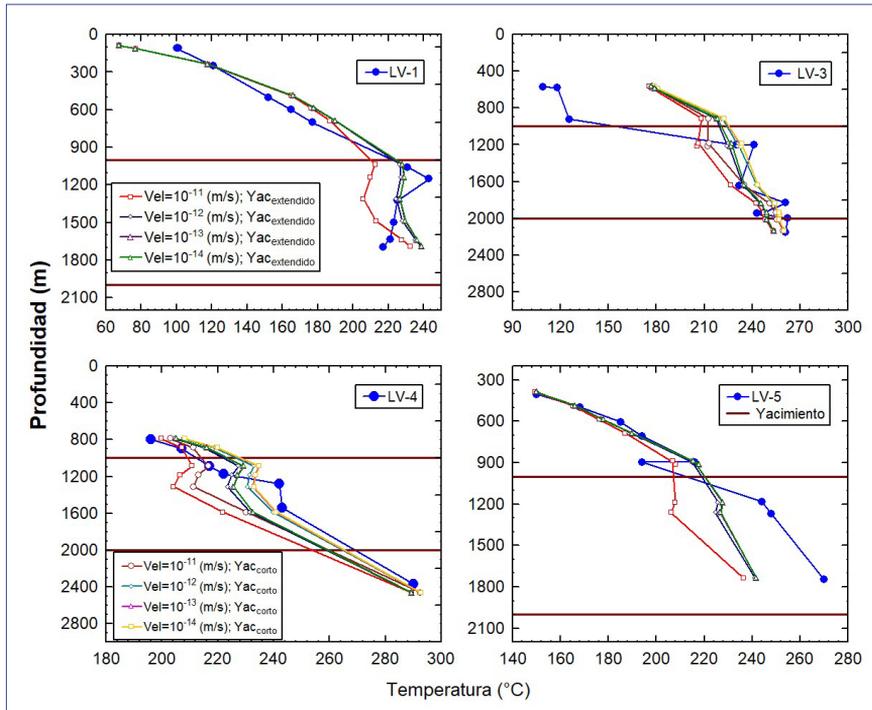
Fuente: Tomado y modificado de López-Villagómez (2023).

## Resultados y discusiones

### Modelado geoquímico del CGLTV

Diferentes órdenes de magnitud de velocidades fueron usados en el código numérico de transferencia de calor conductivo-convectivo, con los cuales se obtuvieron distintos campos de temperatura que fueron comparados con los registros de los pozos del CGLTV. La Figura 7 muestra los resultados de los perfiles de temperatura simulados vs. temperatura de registros de los pozos LV-1, LV-3, LV-4 y LV-5 considerando velocidades con órdenes de magnitud de  $10^{-11}$ ,  $10^{-12}$ ,  $10^{-13}$  y  $10^{-14}$  m/s, respectivamente, para un tiempo total de simulación de 200 años (tiempo requerido para estabilizar la convección en el yacimiento geotérmico).

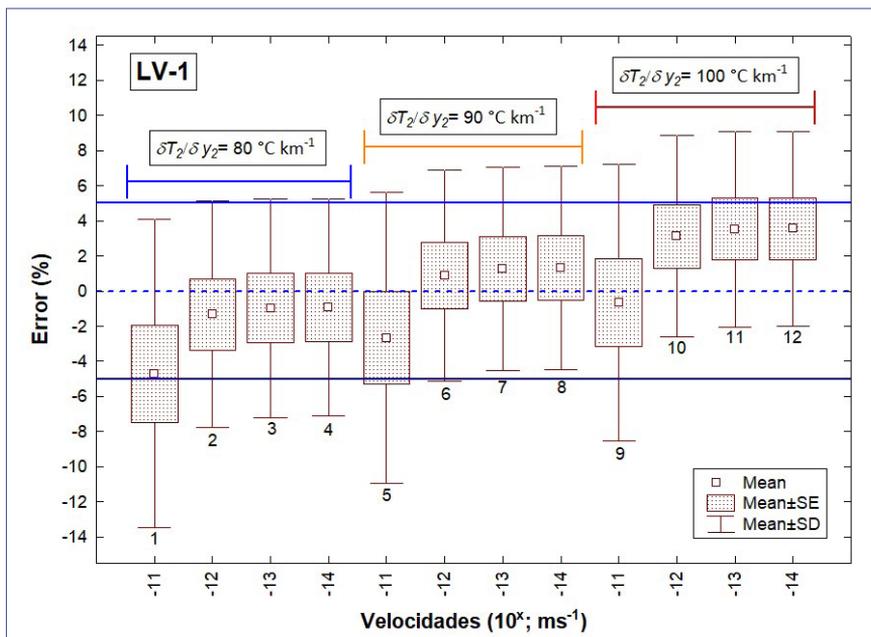
**FIGURA 7.** Perfiles de temperatura simulados a partir de los campos de velocidad de 10-11, 10-12, 10-13 y 10-14 m/s para los pozos LV-1, LV-3, LV-4 y LV-5



Fuente: Elaboración propia.

Para validar el código numérico se realizó un análisis de sensibilidad basado en el análisis de errores normalizados con los diferentes modelos simulados. A manera de ejemplo, la Figura 8 muestra los errores entre 12 perfiles de temperaturas simuladas vs. temperaturas de registro del pozo LV-1. Para todos los modelos se consideró un valor de gradiente de temperatura de 140 °C/km para los primeros 2 000 m de profundidad y se varió el gradiente de 80 °C, 90 °C y 100 °C, respectivamente, de la base del yacimiento (2 000 m) hasta la base del modelo (2 800 m).

**FIGURA 8.** Diagrama Box-plot de los errores normalizados entre los modelos de temperatura simulados vs. temperatura del pozo LV-1. El valor de la exponencial  $10^x$  de la velocidad toma el valor de la escala en  $x$  (p. ej.  $10^{-11}$  m/s)



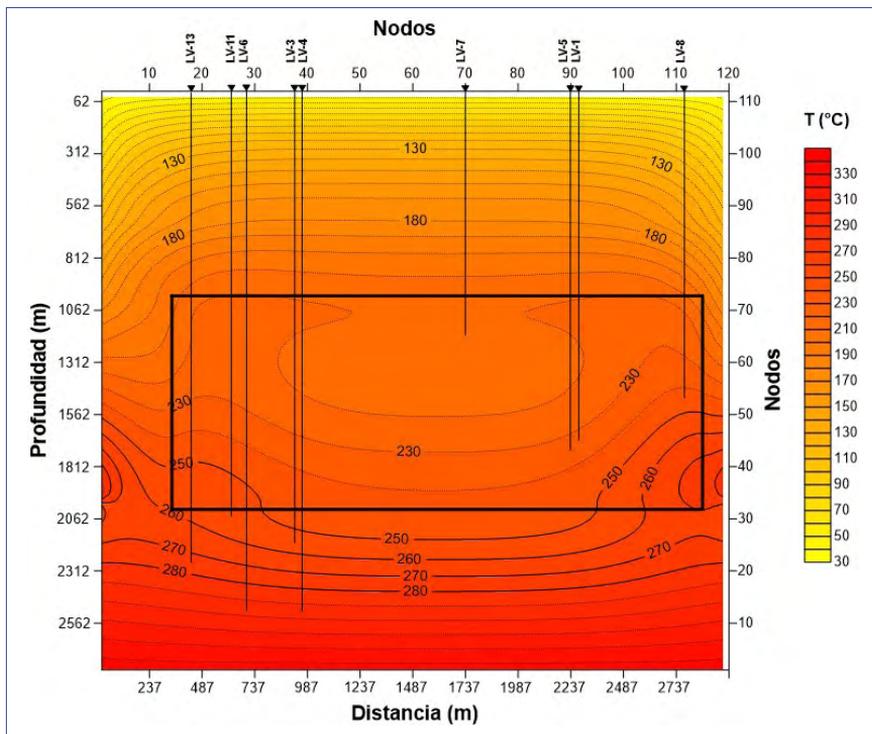
Fuente: Elaboración propia.

El mejor modelo del campo de temperaturas conductivo-convectivo corresponde a velocidades del orden de  $10^{-13}$  m/s con un gradiente de temperatura de  $140 \text{ } ^\circ\text{C/km}$  para los primeros 2 000 m de profundidad y un gradiente de  $90 \text{ } ^\circ\text{C}$  de la base del yacimiento a la base del modelo. La Figura 9 muestra el campo de temperaturas del perfil A-A' (ver Figura 5) del CGLTV para velocidades con orden de magnitud de  $10^{-13}$  m/s.

De manera acoplada, durante la simulación del campo de temperaturas se procedió a modelar el campo de concentraciones de los cationes  $\text{Na}^+$  y  $\text{K}^+$  para los últimos 20 años (que corresponde al tiempo de explotación del campo). Para ello, se evaluaron diferentes composiciones iniciales del fluido basado en la química de las aguas termales y pozos domésticos cer-

canos al área de estudio y los resultados se compararon gráficamente para cada pozo de acuerdo con la composición química del agua geotérmica a condiciones de yacimiento determinada por Valencia-Cabrera (2021). Las concentraciones iniciales del  $\text{Na}^+$  en el fluido geotérmico utilizadas para la modelación geoquímica durante los últimos 20 años de la simulación fueron de 100, 200, 300, 400 y 500 ppm (modelos 1 al 5), respectivamente, mientras que para el  $\text{K}^+$  fueron de 10, 20, 30, 40 y 50 ppm (modelos 1 al 5).

**FIGURA 9.** Perfil de temperatura del CGLTV en 2D. Se indica en los ejes la profundidad, la distancia y los nodos utilizados en el código numérico. El yacimiento se resalta con un cuadrado de color negro a la profundidad correspondiente, en este las isotermas reflejan el efecto de las celdas de convección que se evaluaron únicamente para el área del yacimiento



Fuente: Elaboración propia.

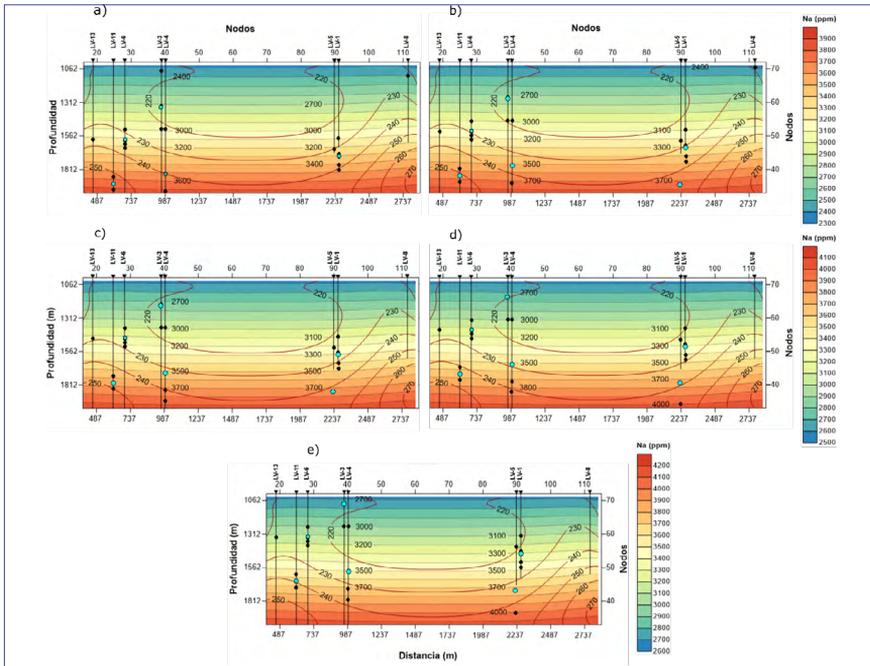
En la Figura 10a-e se muestran los resultados de las concentraciones modeladas para el  $\text{Na}^+$  a partir de las cinco concentraciones iniciales. En general se puede observar que las mayores concentraciones se ubican hacia la base del yacimiento y decrecen hacia la cima. Los pozos se trazaron de acuerdo con el perfil A-A' (ver Figura 5) y su longitud en la vertical corresponde a la profundidad hasta la cual se perforó cada uno de acuerdo con la información reportada por Verma et al. (2006). En cada uno de estos pozos se indica la composición química a condiciones de yacimiento mostrada en la Tabla 2.

De acuerdo con la Figura 10, se puede observar que a medida que la concentración inicial aumenta, las concentraciones resultantes también incrementan. En el modelo 1 (Figura 10a), por ejemplo, los valores de las concentraciones simuladas de  $\text{Na}^+$  se encuentran entre 2 200 ppm (cima del yacimiento) y 3 700 ppm (base del yacimiento); en contraste, en el modelo 5 (Figura 10e) se obtienen valores entre 2 600 ppm y 4 200 ppm. En general, las concentraciones reportadas en la literatura se marcan con un círculo de color negro, mientras las concentraciones promedio para cada pozo se marcan con un círculo de color azul. En el modelo 1 (Figura 10a) las concentraciones promedio de los pozos LV-11, LV-6, LV-3 LV-4 y LV-1 se ubican a una profundidad de 1 912, 1 587, 1 362, 1 837 y 1 712 m respectivamente y, al relacionar estas profundidades con las temperaturas simuladas (Figura 9), podemos ver que estas corresponden a temperaturas mínimas de 217 °C para el pozo LV-3 y máximas de 252 °C para el pozo LV-11.

En el modelo 2 (Figura 10b) se reportan igualmente las concentraciones promedio para los pozos mencionados y además se puede localizar la concentración promedio para el pozo LV-5, las cuales corresponden a profundidades de 1 862, 1 537, 1 287, 1 787, 1 912 y 1 662 m y se encuentran en un rango de temperaturas entre 217 °C para el pozo LV-3 y 250 °C para el pozo LV-11. Para el modelo 3 (Figura 10c) las concentraciones promedio del  $\text{Na}^+$  se encuentran a profundidades de 1 787, 1 462, 1 212, 1 712, 1 862 y 1 587 m respectivamente con temperaturas entre 218 °C para el pozo LV-3 y 246 °C para el pozo LV-11. Para el modelo 4

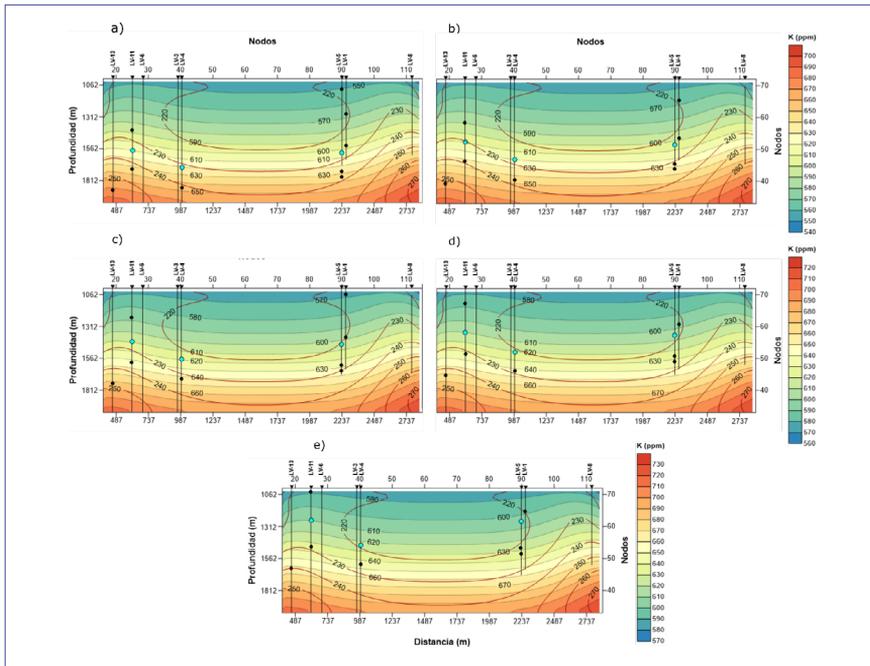
(Figura 10d) se reportan estas concentraciones promedio a profundidades de 1 737, 1 412, 1 162, 1 662, 1 787 y 1 537 m y un rango de temperaturas entre 219 °C para el pozo LV-3 y 241 °C en el pozo LV-1. Finalmente, para el modelo 5 (Figura 10e) los promedios se localizan a 1 662, 1 337, 1 087, 1 612, 1 737 y 1 462 m de profundidad con temperaturas entre 220 °C para el pozo LV-1 y 238 °C en el pozo LV-11. De acuerdo con estos análisis, se puede concluir que los valores simulados del modelo 1 son los que mejor se acercan a los reportados en la literatura, además de que la temperatura simulada para el pozo LV-11 se aproximan más a las temperaturas de equilibrio.

**FIGURA 10.** Perfil de concentraciones de sodio (Na+) en 2D de acuerdo con las concentraciones iniciales de cada modelo propuestos (Figuras a-e; las isolíneas corresponden a concentraciones). Los círculos negros representan las concentraciones a condiciones de yacimiento reportadas en la literatura y los círculos azules representan las concentraciones promedio para cada pozo



Fuente: Elaboración propia.

**FIGURA 11.** Perfil de concentraciones del potasio ( $K^+$ ) en 2D de acuerdo con las concentraciones iniciales de cada modelo propuestos (Figuras a-e; las isólinas corresponden a concentraciones). Los círculos negros representan las concentraciones a condiciones de yacimiento reportadas en la literatura y los círculos azules representan las concentraciones promedio para cada pozo



Fuente: Elaboración propia.

En el caso del potasio ( $K^+$ ) se observó un comportamiento similar al del sodio. En el modelo 1 (Figura 11a) se muestran valores entre 530 y 680 ppm y para el modelo 5 (Figura 11e) concentraciones entre 570 y 740 ppm. En el modelo 1 (Figura 11a), los promedios de concentraciones para los pozos LV-11, LV-4 y LV-5 se encuentran a profundidades de 1 587, 1 712 y 1 612 m con temperaturas de 234 °C, 232 °C y 227 °C respectivamente. Para el modelo 2 (Figura 11b) las concentraciones promedio de los pozos se ubican entre 1 512, 1 662 y 1 537 m con temperaturas de 230 °C, 229 °C y 223 °C respectivamente. En el modelo 3 (Figura 11c) los valores promedio corresponden a profundidades de 1 437, 1 587

y 1 462 m con temperaturas de 227 °C, 225 °C y 220 °C. Para el modelo 4 (Figura 11d) los promedios se localizan a 1 362, 1 512 y 1 362 m de profundidad, con temperaturas de 224 °C, 221 °C y 218 °C respectivamente. Finalmente, para el modelo 5 (Figura 11e) los promedios de concentraciones se localizan a profundidades de 1 287, 1 437 y 1 287 m con temperaturas de 223 °C, 219 °C y 218 °C.

Con base en estos resultados, podemos observar que las temperaturas simuladas en el modelo 1 son las más cercanas a las temperaturas de equilibrio reportadas, además de sugerir que las concentraciones iniciales propuestas para este modelo son las más razonables para el potasio. En los demás modelos, los valores que se obtienen subestiman los datos de temperaturas reportados.

### **Sistema geotérmico de ciclo cerrado en la cuenca de Wagner**

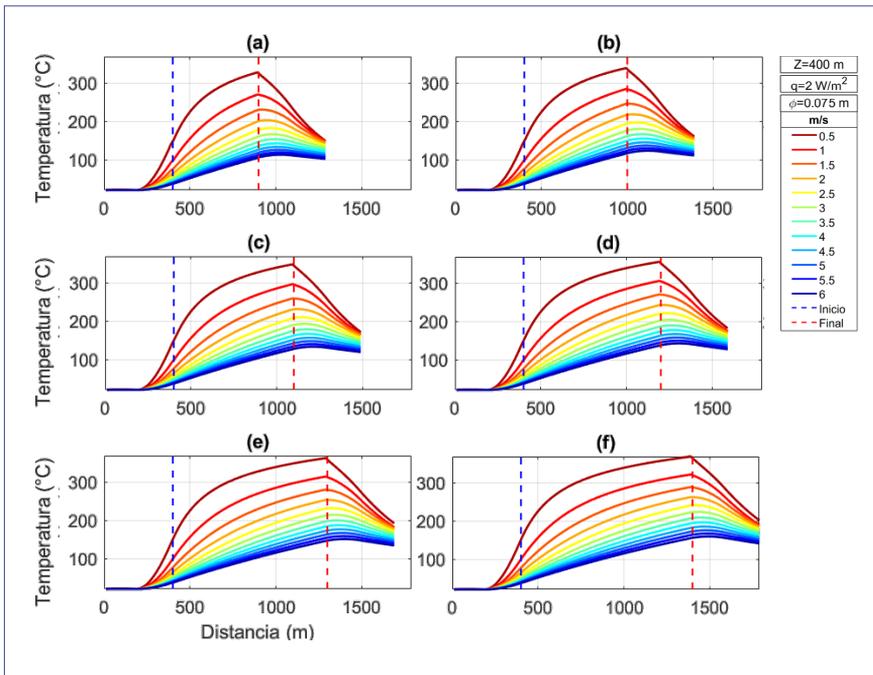
El modelo numérico de transferencia de calor del agua (como fluido de trabajo) en movimiento en un intercambiador de calor en U se validó con los datos reportados por Saucedo-Velázquez et al. (2022).

El comportamiento de la temperatura en el interior del SGCC fue el esperado, ya que la temperatura del agua que entra a 20 °C es calentada debido al gradiente de temperatura de la zona y al flujo de calor. Una vez que el fluido se ubica en la tubería horizontal (fondo del modelo), que es donde se encuentra la temperatura más alta, se seguirá calentando. Finalmente, cuando el agua sube por la tubería, esta se comienza a enfriar debido a que el sistema transfiere calor (pérdida de energía) en su entorno. Para evitar que el fluido pierda temperatura con su entorno durante el ascenso el modelo considera un aislante, con lo cual se obtiene un fluido con mayor temperatura que el inyectado en la entrada.

El comportamiento mencionado anteriormente también fue descrito por Sun et al. (2018), con la diferencia que los autores realizaron su estudio utilizando CO<sub>2</sub> como fluido de trabajo. En la Figura 12 se puede observar

que la temperatura tiene un aumento a partir de los 200 m, lo que es evidente debido a que es la profundidad del piso marino, donde el perfil de temperatura varía de 30 °C en la superficie del mar hasta los 15 °C en el piso marino, donde el aumento de la temperatura y calor se presenta a partir de los 200 m de profundidad debido a la presencia de valores altos de flujo de calor entre 0.5 y 2.0 W/m<sup>2</sup>. En la Figura 12 se muestran los perfiles de temperatura simulados en el interior del SGCC para doce velocidades con un valor de 2.0 W/m<sup>2</sup> y un diámetro de la tubería (Ø) de 0.075 m.

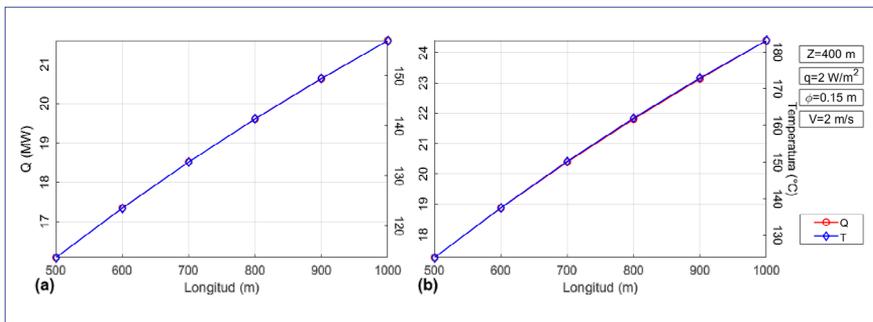
**FIGURA 12.** Comportamiento de la temperatura a lo largo de la tubería considerando 12 velocidades. La profundidad (Z), el flujo de calor y el diámetro de la tubería (Ø) son constantes. Las líneas punteadas azules indican la profundidad de la tubería (descenso del fluido), mientras que las líneas punteadas rojas señalan la profundidad donde comienza el ascenso del fluido. La distancia entre ambas líneas corresponde al inicio y el final de la tubería horizontal con longitudes de: (a) 500 m, (b) 600 m, (c) 700 m, (d) 800 m, (e) 900 m y (f) 1 000 m



Fuente: Elaboración propia.

La distancia horizontal de la tubería influye en los resultados. Esto se debe a que entre mayor sea la longitud, mayor será el tiempo que el fluido permanece en la zona de mayor temperatura, por lo tanto, el valor de la temperatura al final de la tubería horizontal (en el fondo del modelo) será más alto (Sun et al., 2018). La Figura 13 muestra el comportamiento del calor (MW) y la temperatura en función de la longitud de la tubería para una velocidad del fluido de 2 m/s, con un valor de  $2.0 \text{ W/m}^2$  y un diámetro de la tubería de 0.15 m. Al igual que con la profundidad, estas variables están totalmente correlacionadas ya que no hay diferencia en su comportamiento, lo que indica que entre mayor sea la longitud, mayor será la temperatura y el calor. El valor de calor en la salida de la tubería se encuentra por arriba de los 21 MW con una temperatura de  $155 \text{ }^\circ\text{C}$  (Figura 13a), al final de la sección horizontal de la tubería el calor es cercano a los 24 MW con una temperatura aproximada de  $180 \text{ }^\circ\text{C}$  (Figura 13b).

**FIGURA 13.** Comparación de los perfiles de calor y temperatura contra la longitud horizontal. (a) Son los valores en la salida de la tubería y (b) son al final de la tubería horizontal

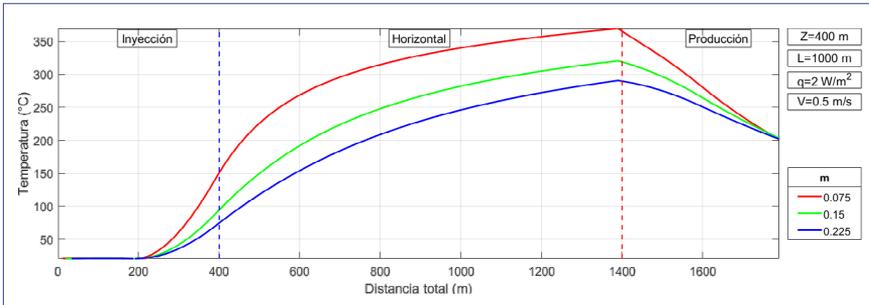


Fuente: Elaboración propia.

El diámetro de la tubería es un parámetro que también afecta la transferencia de calor, por lo que igualmente se tiene que considerar en el modelo. Los resultados indican que entre menor es el diámetro, mayor será la temperatura final. Esto se debe a que con un diámetro pequeño el área de contacto con el fluido es mayor que con un diámetro de mayor tamaño. Este efecto se muestra en la Figura 14.

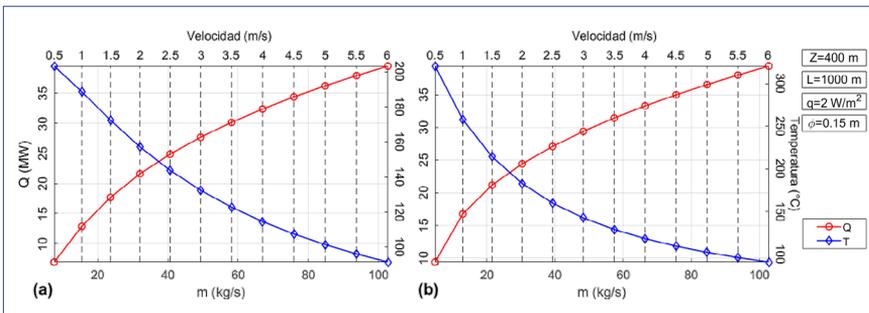
Finalmente, en la Figura 15 se presenta una comparación entre el calor recuperado en el modelo del SGCC y temperatura en función del flujo másico (kg/s) y la velocidad, donde se puede apreciar que con valores de flujo másico alto se obtiene un mayor calor, mientras que la temperatura decrece. El calor ideal (zona de cruce entre las curvas) en ambas secciones de la tubería se encuentra entre los 20-25 MW, y las temperaturas están entre los 140-160 °C en la salida de la tubería (Figura 15a) y cerca de los 200 °C al final de la sección horizontal (Figura 15b).

**FIGURA 14.** Comparación de los perfiles de temperatura con las cuatro configuraciones de flujo de calor



Fuente: Elaboración propia.

**FIGURA 15.** Comparación de los perfiles de calor y temperatura vs. las velocidades. (a) Son los valores en la salida de la tubería y (b) son al final de la tubería horizontal



Fuente: Elaboración propia.

### Escenario actual del potencial geotérmico marino

Los océanos cubren cerca del 75 % de la superficie de la Tierra y albergan mayor potencial geotérmico que la propia corteza continental (López-Villagómez y Gómez-Arias, 2024). Actualmente se han identificado cerca de 280 prospectos geotérmicos localizados en los límites de las placas tectónicas (anillo de fuego), en montes submarinos y en chimeneas hidrotermales (el potencial de una chimenea hidrotermal es del orden de los 15 MW) (Aryadi et al., 2016, López-Villagómez y Gómez-Arias, 2024). Aun así, la energía geotérmica marina se encuentra en desarrollo.

Sin embargo, se han publicado algunas propuestas para generar energía geotérmica marina conocida como *offshore geothermal energy*. Por citar algunos ejemplos: 1) el Proyecto Marsili (ubicado en el mar Tirreno del Mediterráneo) es el primer proyecto geotérmico marino localizado en el monte submarino Marsili (Caso et al., 2010). Paltrinieri et al. (2022) informaron sobre una propuesta para la construcción de una planta geotérmica de 200 MW, con la posibilidad de aumentar la capacidad a 800 MW. Los autores consideran que este proyecto tiene el potencial de ser el primero de su tipo y el desarrollo de la tecnología será de beneficio para futuras propuestas; y 2) en México, además de la cuenca de Wagner, en la cuenca de Guaymas también se han identificado fuentes hidrotermales con temperaturas del orden de los 360 °C a profundidades de ~2 000 m (López-Villagómez y Gómez-Arias, 2024). Estos eventos se encuentran cerca de los límites entre las placas de América del Norte y del Pacífico, donde Hiriart et al. (2010) propusieron el desarrollo de un submarino con una planta de ciclo binaria en su interior conectada a un intercambiador de calor situado en la fuente hidrotermal. Los autores estimaron el potencial de la fuente en 450 MW, y considerando una eficiencia del submarino del 4 %, podría generar 20 MW a partir de la energía geotérmica marina.

## Conclusiones

En el presente trabajo se modeló el campo de temperaturas para el CGLTV a partir del campo de velocidades de orden de magnitud  $10^{-13}$  m/s, con un gradiente de temperatura de  $1$  °C/km en los primeros  $2\ 000$  m de profundidad y  $90$  °C/km de la base del reservorio a la base del modelo, dado que fueron las condiciones con las que se obtuvieron las mejores estimaciones de temperatura con respecto a los registros de los pozos, con errores que varían entre  $\pm 4$  %. En este trabajo se propone que a partir de concentraciones de  $100$  ppm para el  $\text{Na}^+$  y  $10$  ppm para el  $\text{K}^+$  y un reservorio localizado entre  $1\ 450$  y  $2\ 450$  m de profundidad se pueden reproducir las concentraciones a condiciones de yacimiento del agua geotérmica para el CGLTV reportadas en la literatura. Estos resultados permiten ampliar el conocimiento acerca del proceso de interacción fluido-roca y la alteración hidrotermal que ocurre en el yacimiento, además de favorecer el uso de geotermómetros de solutos de  $\text{Na}^+/\text{K}^+$  basados en actividades iónicas propuestos en la literatura como métodos de exploración geoquímica de recursos geotérmicos.

Por otra parte, se modeló el intercambio de calor en un sistema geotérmico de ciclo cerrado (SGCC, con una configuración de tubería en U) mediante el Método de Volumen Finito (MVF) o Método Volumen de Control (MVC). Los parámetros utilizados para los diferentes modelos (configuraciones) desarrollados fueron: una profundidad de  $400$  m; longitud horizontal de la tubería de  $500$ ,  $600$ ,  $700$ ,  $800$ ,  $900$ ,  $1\ 000$  m, respectivamente; un flujo de calor de  $2.0$  W/m<sup>2</sup>; diámetro de la tubería de  $0.075$ ,  $0.15$  y  $0.225$  m; y velocidades de  $0.5$ ,  $1$ ,  $1.5$ ,  $2$ ,  $2.5$ ,  $3$ ,  $3.5$ ,  $4$ ,  $4.5$ ,  $5$ ,  $5.5$  y  $6$  m/s. Los dos parámetros que más influyen en el cambio de temperatura y la extracción de calor son el diámetro de la tubería ( $\emptyset$ ) y la velocidad de fluido. La velocidad óptima para alcanzar tanto una temperatura como un calor adecuado es de  $2$  m/s., mientras que el diámetro recomendado es de  $0.15$  m. Con esta configuración los valores óptimos de calor y temperatu-

ra a la salida del SGCC corresponden a 157 °C y 22 MW y, al final de la tubería horizontal de 183.3 °C y 25 MW.

Finalmente, el estado actual de la energía geotérmica en México enfrenta grandes desafíos, los cuales deben ser abordados de manera urgente para mejorar la incertidumbre tanto en las técnicas de exploración como en los métodos de estimación del potencial geoenergético, sin dejar de lado uno de los mayores desafíos: establecer mecanismos que conlleven a una inclusión social, cultural y ambiental responsable en los proyectos geotermoeléctricos. Superar estos desafíos permitirá alcanzar un aprovechamiento sostenible del recurso geotérmico cortical y marino. Por lo tanto, la energía geotérmica (tipificada como una energía renovable y limpia con bajas emisiones de gases de efecto invernadero) incide de manera significativa en el avance y cumplimiento del objetivo ODS 7 (energía renovable asequible y no contaminante) de la Agenda 2030 en México.

## **AGRADECIMIENTOS**

*Un especial agradecimiento a la M. C. Yesica Ximena Peña Beltrán y al M. C. Óscar López Villagómez, becarios Conahcyt, por su valiosa colaboración en las líneas de investigación de la exploración y evaluación de recursos geotérmicos cortical y marino en el noroeste de México. A los proyectos 2074 Investigadores por México (Campaña intensiva de exploración geotérmica del Golfo de California) y P03 del CeMIE-Geo (Campaña intensiva de exploración geotérmica de las cuencas Wagner, Consag, Delfín, Guaymas y Alarcón del Sistema de Rifts del Golfo de California). A los revisores anónimos por sus comentarios y observaciones para mejorar y enriquecer el contenido del presente capítulo de libro.*

## REFERENCIAS

- Aragón-Arreola, M., y Martín-Barajas, A. (2007). Westward migration of extension in the northern Gulf of California, Mexico. *Geology*, 35(6), 571-574. <https://doi.org/10.1130/G23360A.1>
- Aryadi, Y., Rizal, I. S., y Fadhlí, M. N. (2016). Electricity generation from hydrothermal vents. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 42, 012019. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/42/1/012019>
- Blum, A. E., y Stillings, L. L. (1995). Feldspar dissolution kinetics. En A. F. White y S. L. Brantley (Eds.), *Chemical weathering rates of silicate minerals* (pp. 91-351). Mineralogical Society of America. <https://doi.org/10.1515/9781501509650-009>
- Caso, C., Signanini, P., De Santis, A., Favali, P., Lezzi, G., Marani, M. P., Paltrinieri, D., Luigi-Rainone, M., y Di Sabatino, B. (2010, 25-29 de abril). *Submarine geothermal systems in Southern Tyrrhenian Sea as future energy resource: The example of Marsili Seamount* [Presentación en papel]. Proceedings World Geothermal Congress, Bali, Indonesia. <http://www.geothermal-energy.org/pdf/IGAstandard/WGC/2010/3709.pdf>
- D'amore, F., y Panichi, C. (1985). Geochemistry in geothermal exploration. *International Journal of Energy Research*, 9(3), 277-298. <https://doi.org/10.1002/er.4440090307>
- DiPippo, R. (2022). Pathé geothermal power plant, Hidalgo, Mexico: A comprehensive retrospective assessment of the first plant of its kind in the Americas. *Geothermics*, 98, 102285. <https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2021.102285>
- Giggenbach, W. F. (1988). Geothermal solute equilibria. Derivation of Na-K-Mg-Ca geoindicators. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 52(12), 2749-2765. [https://doi.org/10.1016/0016-7037\(88\)90143-3](https://doi.org/10.1016/0016-7037(88)90143-3)

- Gutiérrez-Negrín, L. C. A., Canchola-Félix, I., Romo-Jones, J. M., y Quijano-León, J. L. (2020, abril-octubre). *Geothermal energy in Mexico: Update and perspectives* [Presentación en papel]. Proceedings World Geothermal Congress, Reykjavik, Iceland. <https://www.researchgate.net/publication/343111483>
- Helenes, J., Carreño, A. L., y Carrillo, R. M. (2009). Middle to late Miocene chronostratigraphy and development of the northern Gulf of California. *Marine Micro-paleontology*, 72(1-2), 10-25. <https://doi.org/10.1016/j.marmicro.2009.02.003>
- Helgeson, H. C., Murphy, W. M., y Aagaard, P. (1984). Thermodynamic and kinetic constraints on reaction rates among minerals and aqueous solutions. II. Rate constants, effective surface area, and the hydrolysis of feldspar. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 48(12), 2405-2432. [https://doi.org/10.1016/0016-7037\(84\)90294-1](https://doi.org/10.1016/0016-7037(84)90294-1)
- Hiriart, G., Gutiérrez-Negrín, L. C. A., Quijano-León, J. L., Ornelas, A. C., Espíndola, S., y Hernández, I. (2011). *Evaluación de la energía geotérmica en México: informe para el Banco Interamericano de Desarrollo y la Comisión Reguladora de Energía*. CRE, IBD. <https://www.cre.gob.mx/documento/2026.pdf>
- Hiriart, G., Prol-Ledesma, R. M., Alcocer, S., y Espíndola, A. (2010, 25-29 de abril). *Submarine geothermics; hydrothermal vents and electricity generation* [Presentación en papel]. Proceedings World Geothermal Congress, Bali, Indonesia. <https://www.geothermal-energy.org/pdf/IGAstandard/WGC/2010/3704.pdf>
- López-Villagómez, Ó. (2023). *Modelación, evaluación y estimación del potencial geotérmico para la generación de energía eléctrica en la Cuenca de Wagner* [Tesis de maestría]. Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada.
- López-Villagómez, Ó., y Gómez-Arias, E. (2024). Closed-loop geothermal systems: A way to harness geothermal energy. En M. Jeguirim (Ed.), *Sustainable development of renewable energy: Latest advances in production, storage, and integration* (pp. 251-278). Editorial Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-443-13613-9.00002-7>
- Misra, K. C. (2012). *Introduction to geochemistry: principles and applications*. John Wiley & Sons.

- Neumann, F., Negrete-Aranda, R., Harris, R. N., Contreras, J., Sclater, J. G., y González-Fernández, A. (2017). Systematic heat flow measurements across the Wagner Basin, northern Gulf of California. *Earth and Planetary Science Letters*, 479, 340-353. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2017.09.037>
- Palandri, J. L., y Kharaka, Y. K. (2004). *A compilation of rate parameters of water-mineral interaction kinetics for application to geochemical modeling*. U. S. Geological Survey. <https://apps.dtic.mil/sti/pdfs/ADA440035.pdf>
- Paltrinieri, D., Favali, P., Italiano, F., Signanini, P., Caso, C., y Armani, F. B. (2022). The Marsili Seamount Offshore Geothermal Reservoir: A big challenge for an energy transition model. *Energies*, 15(5), 1-16. <https://doi.org/10.3390/en15051900>
- Patankar, S. V. (1980). *Numerical heat transfer and fluid flow*. McGraw-Hill Book Company. <https://doi.org/10.1201/9781482234213>
- Peña-Beltrán, Y. X. (2022). *Modelado numérico en 2D del transporte de solutos (Na, K, Ca y Mg) en un yacimiento geotérmico: el caso de Las Tres Virgenes, BCS* [Tesis de maestría]. Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada.
- Peña-Domínguez, J. G., Negrete-Aranda, R., Neumann, F., Contreras, J., Spelz, R. M., Vega-Ramírez, L. Á., y González-Fernández, A. (2022). Heat flow and 2D multichannel seismic reflection survey of the Devil's Hole geothermal reservoir in the Wagner basin, northern Gulf of California. *Geothermics*, 103, 102415. <https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2022.102415>
- Prol-Ledesma, R. M., Torres-Vera, M. A., Rodolfo-Metalpa, R., Ángeles, C., Lechuga-Devez, C. H., Villanueva-Estrada, R. T., Shumilin, E., y Robinson, C. (2013). High heat flow and ocean acidification at a nascent rift in the northern Gulf of California. *Nature Communication*, 4, 1388. <https://doi.org/10.1038/ncomms2390>
- Romo-Jones, J. M., Gutiérrez-Negrín, L. C. A., y Canchola-Félix, I. (2020). *2019 Mexico Country Report*. International Energy Agency Geothermal. <https://iea-gia.org/about-us/members/mexico/>

- Romo-Jones, J. M., Gutiérrez-Negrín, L. C. A., y Canchola-Félix, I. (2022). *2020 Mexico Country Report*. International Energy Agency Geothermal. <https://iea-gia.org/publications-2/annual-reports/>
- Saucedo-Velázquez, J., Gutiérrez-Urueta, G., Wong-Loya, J. A., Molina-Rodea, R., y Franco, W. R. G. (2022). Cooling potential for single and advanced absorption cooling systems in a geothermal field in Mexico. *Processes*, *10*(3), 533. <https://doi.org/10.3390/pr10030583>
- Sena-Lozoya, E. B., González-Escobar, M., Gómez-Arias, E., González-Fernández, A., y Gómez-Ávila, M. (2020). Seismic exploration survey northeast of the Tres Virgenes geothermal field, Baja California Sur, Mexico: A new geothermal prospect. *Geothermics*, *84*, 101743. <https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2019.101743>
- Sun, F., Yao, Y., Li, G., y Li, X. (2018). Geothermal energy development by circulating CO<sub>2</sub> in a U-shaped closed loop geothermal system. *Energy Conversion and Management*, *174*, 971-982. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2018.08.094>
- Valencia-Cabrera, D. (2021). *Determinación del estado de equilibrio químico fluido-roca del yacimiento geotérmico Las Tres Vírgenes (BCS) a partir de la geotermometría de solutos y de SiO<sub>2</sub>* [Tesis de maestría en Ciencias]. Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, Baja California.
- Vázquez-Figueroa, V., Canet, C., Prol-Ledesma, R. M., Sánchez, A., Dando, P., Camprubí, A., Robinson, C. J., y Hiriart Le Bert, G. (2009). Batimetría y características hidrográficas (Mayo, 2007) en las Cuencas de Consag y Wagner, Norte de California, México. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, *61*(1), 119-127.
- Verma, S. P., Pandarinath K., Santoyo, E., González, P. E., Torres, A. I. S., y Tello, H. E. (2006). Fluid chemistry and temperatures prior to exploitation at the Las Tres Virgenes geothermal field, Mexico. *Geothermics*, *35*(2), 156-180. <https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2006.02.002>
- Versteeg, H. K., y Malalasekera, W. (2007). *An introduction to computational fluid dynamics: The finite volume method*. Pearson Education.

Xamán, J., y Gijón-Rivera, M. (2016). *Dinámica de fluidos computacional para ingenieros*. Palibrio.

Xu, T., Hu, Z., Feng, B., Feng, G., Li, F., y Jiang, Z. (2020). Numerical evaluation of building heating potential from a co-axial closed-loop geothermal system using wellbore-reservoir coupling numerical model. *Energy Exploration and Exploitation*, 38(3), 733-754. <https://doi.org/10.1177/0144598719889799>

# CAPÍTULO 2.

## ESCENARIOS DE DESARROLLO SOSTENIBLE EN UNA ZONA DE EXPLORACIÓN GEOTÉRMICA Y UN CAMPO GEOTERMOELÉCTRICO EN PUEBLA, MÉXICO

**Marco Antonio García Zárate,<sup>1</sup> Zayre Ivonne González Acevedo,<sup>1\*</sup> Ricardo Eaton González<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, Baja California. Ensenada, Baja California, México, 22860.

\*zgonzale@cicese.mx

<sup>2</sup>Facultad de Ciencias Marinas, Universidad Autónoma de Baja California. Ensenada, Baja California, México, 22860.

### Resumen

**P**ara enfrentar la crisis ambiental en el planeta es clave el desarrollo de energías alternativas, renovables y/o limpias, tal es el caso de la energía geotermoeléctrica. Esta, a pesar de las ventajas que representa, también tiene efectos adversos al ambiente, principalmente a través de los fluidos profundos que llegan a la superficie. Para hacer una evaluación integral de esta energía, se echa mano del concepto de desarrollo sostenible que incluye evaluaciones de calidad ambiental, social y económica en un sitio en exploración y un campo geotermoeléct-

trico con más de 20 años de operación, ambos situados al norte del estado de Puebla, México, donde se construyeron escenarios de desarrollo sostenible a meso- y microescala. El análisis a mesoescala se basó en la generación de nueve índices que consideran las variables ambientales, sociales y económicas del sitio y la suposición de un escenario optimista, actual y pesimista a partir del análisis en campo de las variables involucradas. En el caso del análisis a microescala se aplicó el análisis booleano del polígono de exploración y explotación respectivamente a partir del análisis de la calidad ambiental en temporadas de secas y poslluvias y de las variables sociales y económicas. Este tipo de análisis multicriterio es una alternativa metodológica especialmente útil para identificar las zonas que tienen características comunes para un objetivo específico y que mantendrán el equilibrio medioambiental, social y económico, mientras se respeten durante la exploración y el desarrollo de la central geotermoeléctrica.

Palabras clave: **Ambiente; economía; sociedad; calidad; índices.**

---

## Abstract

To face the environmental crisis on the planet, the development of alternative, renewable and/or clean energies is key, such is the case of geothermal energy. This energy, despite the advantages it represents, also has adverse effects on the environment, mainly through the deep fluids that reach the surface. In order to make an integral evaluation of this energy, the concept of sustainable development is used, which includes evaluations of environmental, social and economic quality in an exploration site and a geothermal power plant with more than 20 years of operation, both located in the north of the state of Puebla, Mexico. Sustainable development scenarios were constructed at meso and micro-scales. The meso-scale analysis was based on the generation of nine indexes that consider the environmental, social and economic variables of the site and the

assumption of an optimistic, current, and pessimistic scenario based on the field analysis of the variables involved. In the case of the micro-scale analysis, the Boolean analysis of the exploration and exploitation polygon was applied, respectively, based on the analysis of the environmental quality in dry and post-rainy seasons and of the social and economic variables. This type of multi-criteria is a particularly useful methodological alternative to identify areas that have common characteristics for a specific objective and that will maintain the environmental, social and economic balance, if these areas are respected during the exploration and development of the geothermal power plant.

Keywords: **Environment; economy; society; quality; indexes.**

## Introducción

El incremento en la demanda de energía eléctrica, en contraste con la creciente conciencia sobre los efectos perjudiciales de la quema de combustibles fósiles en el ambiente, ha ocasionado un mayor interés en todo el mundo por el uso de fuentes de energía limpias, alternativas y/o renovables (DOF, 2008; Fridleifsson, 2003), siendo la energía geotérmica una prometedora fuente de energía alternativa que ha demostrado ser fiable, limpia y segura (Mason et al., 2010; Purkus y Barth, 2011). La infraestructura para la producción de energía fósil, hidroeléctrica y nuclear ha encontrado oposición pública debido a los impactos negativos al ambiente que estos tipos de energía provocan. En general, la mayoría de la población todavía no conoce bien la energía geotérmica, por lo que se podría esperar que el desarrollo geotérmico llegase a ser menos controvertido, considerando que la energía geotérmica bien gestionada es una fuente de energía respetuosa con el ambiente, la cual tiene una buena estabilidad y puede producir electricidad de manera constante y por largos periodos de tiempo en comparación con otras energías como la solar y la eólica. A pesar de lo anterior, el consenso de expertos y los últimos 40 años de experiencia han demostrado que la geotermia no está completamente libre de efectos adversos para el ambiente (Barbier, 1997; Fridleifsson, 2001; Rybach, 2003).

Uno de los principales factores de la generación de energía eléctrica a partir de los recursos geotérmicos que pueden tener un impacto negativo en el ambiente son los fluidos geotérmicos. Dichos fluidos regularmente contienen elementos potencialmente tóxicos provenientes del yacimiento geotérmico profundo (alrededor de 2 000 m) que pueden ser liberados a la superficie en forma gaseosa, líquida o sólida (Dickson y Fanelli, 2003). Por ello, las repercusiones ambientales del desarrollo geotérmico variarán según los países, ya que la naturaleza del recurso geotérmico dependerá de la naturaleza del yacimiento, las fases de desarrollo de la energía geotermoelectrica y las prácticas del desarrollador. Por ejemplo, se promueve a

nivel mundial la reinyección de la salmuera geotérmica después del proceso de extracción y generación, sin embargo, en algunos países aún se tienen depósitos de salmuera en la superficie (Ariki et al., 2000; Cao et al., 2022; Gunnlaugsson, 2012; Hoteit et al., 2021; Özcan y Ekici, 2021).

Cuando se habla de desarrollo sostenible, la recopilación de datos medioambientales de referencia es esencial para evaluar el impacto de las actividades de un proyecto, considerando también el desarrollo económico y social, en la implementación de las energías renovables. Se debe entender por energías renovables a las energías que se obtienen de fuentes naturales que virtualmente se consideran inagotables, ya sea por su propia naturaleza, de manera que pueden suplir a las fuentes de energía convencionales como el petróleo, el gas natural y la combustión de carbón, generando una posibilidad de renovación y, por ende, un menor efecto negativo en el ambiente (Osman et al., 2022).

Las energías renovables, sin duda, se han convertido en parte integral de las acciones prioritarias en el combate contra la crisis ambiental que se está enfrentando actualmente. Sin embargo, aún no se llega a comprender a fondo su viabilidad y las ventajas que ofrecen para cumplir con los objetivos, las políticas medioambientales y la legislación vigente en la materia, incluyendo el análisis de los elementos del medio físico que permitan asegurar un equilibrio ecológico dentro de campos geotermoeléctricos durante todo su desarrollo (Apergis y Tsoumas, 2011; Sener, 2021).

El reducido impacto medioambiental asociado al aprovechamiento de los recursos geotérmicos, frente al de la mayoría de las otras fuentes de energía, constituye uno de los argumentos más sólidos para el fomento de su desarrollo. Este tipo de proyectos permitiría generar energía renovable no convencional, según se define esta en la legislación eléctrica, lo que contribuirá a satisfacer la creciente demanda, sustituyendo el uso de combustibles fósiles, considerando que la geotermia puede constituir una opción energética para el desarrollo sostenible del país. Internacionalmente, la energía geotérmica ha demostrado su factibilidad técnica, social, económi-

ca y ambiental para la generación de energía eléctrica a mediana y gran escala (Barasa Kabeyi, 2019; Soltani et al., 2021; Tomaszewska et al., 2018).

Esta investigación se enfoca en evaluar y comparar las condiciones medioambientales existentes para la determinación de los Indicadores del Sistema Ambiental (ISA) para una zona de exploración geotérmica y un campo geotermoeléctrico en Puebla, México, considerando escenarios de desarrollo sostenible a meso- y micro escala.

## Áreas de estudio

---

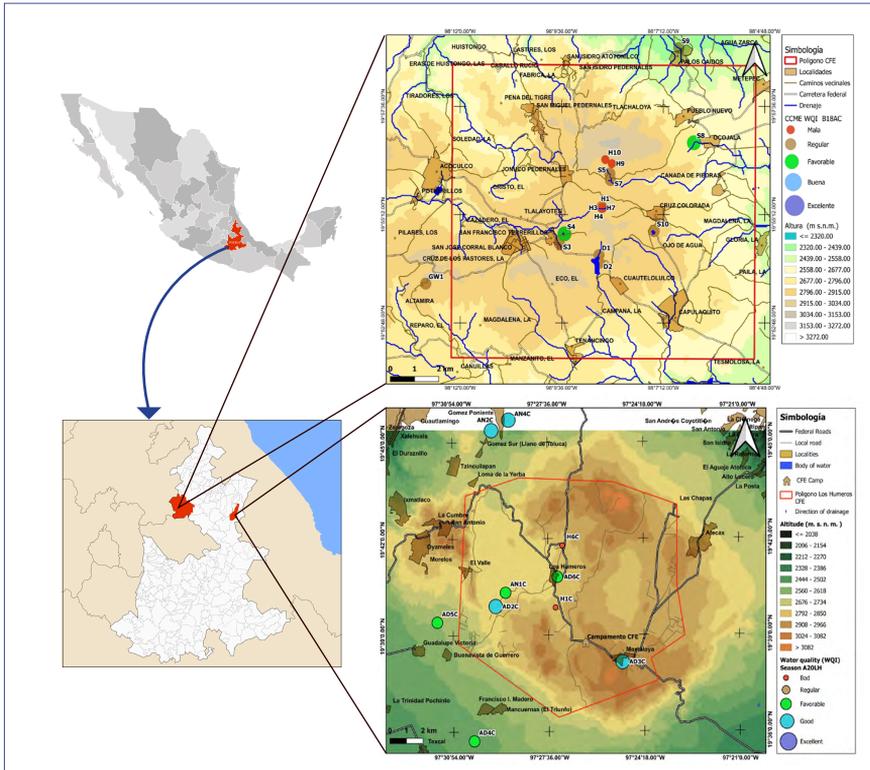
### Zona de exploración geotérmica, Acoculco, Puebla

El sitio geotérmico de Acoculco está localizado en el municipio de Chignahuapan, Puebla, México. Se encuentra a 180 km de la Ciudad de México a una altura de 2 800 a 2 900 msnm. Comprende un área de 1 290 km<sup>2</sup> y tiene dos áreas hidrotermales con expresiones ácidas frías: Los Azufres y La Alcaparrosa (Rocha-López et al., 2006; Tello-Hinojosa, 1994) (Mapa 1). De acuerdo con los estudios de Tello-Hinojosa (1994), este sitio se encuentra caracterizado con 39 expresiones geotérmicas, con aguas superficiales con temperaturas de 13 °C a 49 °C y expresiones en forma de manantiales fríos con aguas ácido-sulfatadas con emisiones de H<sub>2</sub>S que se mezclan en las aguas superficiales (Viggiano-Guerra et al., 2011). Según el sistema hidrotermal mineralógico y de baja permeabilidad, este sitio podría ser desarrollado como un sistema geotérmico mejorado. Las localidades cercanas a las áreas hidrotermales son: La Soledad, San Miguel, El Cristo, San José Corral Blanco, San Francisco Terrerillos, Cuautelolulco, Capulaquito, Cruz Colorada, Jonuco Pedernales, Pueblo Nuevo, Ocojala y Tlachaloya, comunidades que basan su economía en el aprovechamiento del bosque circundante, el pastoreo de borregos y la agricultura local.

## Zona geotermoeléctrica, Los Humeros, Puebla

La localidad de Los Humeros se encuentra dentro del municipio de Chignautla, Puebla, México. Este sitio se localiza en un valle formado por una caldera volcánica, situado en el extremo oriental del cinturón volcánico mexicano a 200 km al este de la Ciudad de México, con elevación de 2 806 msnm con coordenadas geográficas de 19° 35' y 19° 45' de latitud Norte; 97° 35' y 97° 35' de longitud Oeste. Los Humeros es el tercero de los cuatro campos geotermoeléctricos actuales que producen electri-

**MAPA 1.** Áreas de estudio dentro del estado de Puebla, México, municipios de Chignahuapan y Chignautla



Fuente: Elaboración propia.

cidad en México por parte de la Comisión Federal de Electricidad (CFE) con una capacidad de operación de 119.8 MW y una generación eléctrica de 501.5 GWh (Gutiérrez-Negrín et al., 2021) (Mapa 1). De acuerdo con los estudios de González-Partida et al. (2001), los manantiales cercanos al campo geotérmico son de tipo bicarbonatado-sódico, lo cual demuestra el origen de aguas meteóricas de reciente infiltración. Las localidades cercanas a la planta geotérmica de Los Humeros son: Las Chapas, Rancho Nuevo, El Valle, Buenavista de Guerrero y Maxtaloya.

## Descripción ambiental

### Orografía y topografía, Acoculco, Puebla

El relieve es variado, los sistemas de topoformas que existen son: sierra volcánica de laderas escarpadas en la parte norte y noroeste, lomerío de tobas con llanuras al oeste, llanura con lomerío de piso rocoso en la parte centro-sur y lomerío de tobas al suroeste. Redondo (2 850 m), con las coordenadas al norte  $19^{\circ} 53'$  y al oeste  $98^{\circ} 12'$ .

### Orografía y topografía, Los Humeros, Puebla

Los Humeros presenta los caracteres típicos de un sistema montañoso de pendiente moderada con altitudes de 2 800 a 2 950 msnm, dentro del área de estudio; son comunes las cotas de 2 900 msnm, en tanto que los fondos de los llanos de Atoluca y Perote se sitúan a cotas entre 2 400 msnm. Los rasgos geomorfológicos del campo Los Humeros son el resultado de una serie de eventos magmáticos del tipo explosivo durante el terciario y el cuaternario.

Al poniente de estos cerros se encuentra un pequeño valle donde se concentra la mayor parte de la población. Hacia el sur se encuentra la zona de mayor altitud, formada por los cerros Hilillo (3 100 msnm) y Arenas (3 000 msnm); al parecer estas grandes elevaciones forman par-

te de la Gran Caldera de Los Humeros. La caldera de este volcán tiene un diámetro de entre 15 a 21 kilómetros y su última erupción fue hace 20 000 años, aunque ahora presenta una pequeña actividad fumarólica y depósitos de azufre.

### **Vegetación y uso de suelo, Acoculco, Puebla**

Vegetación secundaria arbustiva bosque de pino (bosque mixto), bosque de pino-encino y pastizal inducido. El uso de suelo que predomina en el municipio es la agricultura de temporal, distribuido en casi todo el territorio municipal, excepto en las zonas montañosas. En los lugares con mayores elevaciones la vegetación es básicamente de coníferas, generalmente asociada con vegetación secundaria arbustiva. El principal es el bosque de pino, que se distribuye en una franja en dirección sur-sureste; una pequeña porción de bosque de pino-encino se localiza al oeste de la entidad (SMRN, 2007). El pastizal inducido está presente en el municipio en un bloque al oeste y otro más pequeño al noroeste. Otro uso de suelo es el urbano, localizado sobre todo en la porción oeste. *Bosque de pino*: ocupa 40.5 % del área de estudio, aproximadamente 49 900 hectáreas. *Bosque de pino-encino*: se encuentra en 2.3 % de la superficie total, equivalentes a 2 987 hectáreas. *Pastizal inducido*: este tipo de vegetación ocupa 1 644 hectáreas de la zona, aproximadamente 1.3 % de la superficie total de estudio.

### **Vegetación y uso de suelo, Los Humeros, Puebla**

La vegetación predominante corresponde al tipo de pino y pino-encino y en las partes medias y bajas pastizales naturales e inducidos y en menor proporción un matorral xerófilo con predominancia de suculentas como agaves y nolinás. Como resultado de los métodos vegetativos implantados se ha conseguido la rehabilitación de las áreas afectadas en las que ya se han establecido de manera natural varias especies de plantas, principalmente de vegetación secundaria. Mediante la reforestación se plantan anualmente decenas de miles de árboles y se ha alcanzado un

porcentaje de sobrevivencia promedio de 60 % y un máximo de 81 % en 1996, hecho sin precedente en esta materia; hasta 2002 se habían plantado 585 666 árboles en una superficie de 332.21 hectáreas (Pastrana-Melchor et al., 2005).

### **Hidrología, Acapulco, Puebla**

La región hidrológica se compone de Tuxpan-Nautla con 76 % de la superficie municipal, Pánuco (22 %) y Balsas (2 %). Las cuencas más importantes incluyen el río Tecolutla que abarca 76 % de la superficie del municipio, el río Moctezuma que representa el 22 % y el río Atoyac con tan solo 2 %, mientras que las subcuencas que destacan son la del río Laxaxalpan (73 %), laguna Tochac y Tecocomulco (13 %), río Metztlán (9 %), río Necaxa (2 %), río Zahuapan (2 %) y río Tecuantepec (1 %). Chignahuapan cuenta con corrientes de agua perennes nombradas Ario, Ahualtongo, Blanco, Cantarranas, Hondo, San Pedro, Totolapa y Xalatlaco e intermitentes como Agua Escondida, Capulaque, Hondo, La Mora y San Lorenzo (PIGMEUM, 2009).

### **Hidrología, Los Humeros, Puebla**

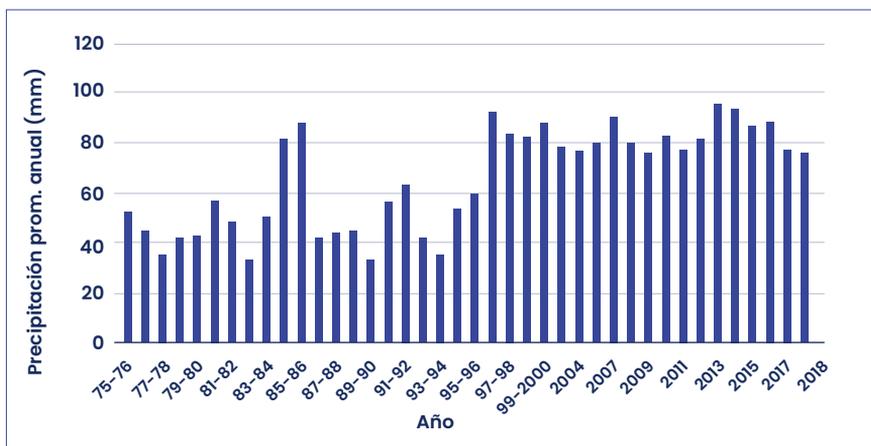
La región hidrológica del río Balsas es una de las más importantes del país. Se extiende desde Michoacán y alcanza una pequeña porción de Veracruz, donde está limitada por las elevaciones que circundan la cuenca Oriental-Perote, entre las que destacan la caldera de Los Humeros, el volcán Pico de Orizaba, el Cofre de Perote y el volcán Atlitzin o Sierra Negra. Hacia el sur de estas montañas, y al norte, la región se encuentra delimitada por los parteaguas del Eje Neovolcánico y la Sierra Madre del Sur, respectivamente. El rasgo hidrográfico más sobresaliente de esta cuenca es el río Atoyac, nombre con la que se describe, que se forma a partir de la unión de los ríos San Martín o Frío que baja de la Sierra Nevada, de Puebla y Zahuapan de Tlaxcala que llega de la sierra de Tlaxco; el agua de esta corriente y sus afluentes se aprovechan en las actividades agrícolas,

domésticas e industriales. Esta porción se caracteriza por lo agreste de su topografía y el grado de pendiente de los arroyos, ya que, sin control, pueden llegar a causar pérdidas en la agricultura. El río Atoyac recibe las aportaciones de las corrientes permanentes de los ríos Mixteco, Nexapa y Tlapaneco; el escurrimiento medio anual de los ríos Atoyac y Nexapa se estima en 458 millones de metros cúbicos.

### Clima, Acozulco, Puebla

Las condiciones climáticas que se presentan son templadas húmedas, con precipitaciones en verano y otoño con un promedio anual de 727 mm, de acuerdo con el registro mensual de la estación meteorológica 21140 “Estación Chignahuapan” durante el periodo 1994-2017. Con base en información de la Comisión Nacional del Agua (Gráfica 1), que reporta datos de distintas estaciones climatológicas (Conagua, 2021), el periodo de lluvia más alto se registra en los meses de junio a septiembre, con desde 217.0 hasta 322.5 mm.

**GRÁFICA 1.** *Precipitación por ciclo de lluvia de 1975 a 2018, datos del promedio anual (mm) para la estación meteorológica del municipio de Chignahuapan, Puebla*



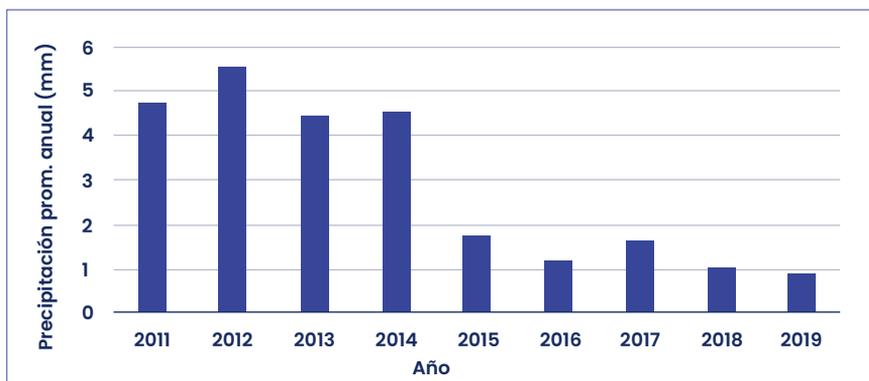
Fuente: Elaboración propia con datos de Conagua (2021).

La temperatura media oscila entre 12 °C y 17 °C. El tipo de clima presente en esta zona va desde templado húmedo hasta semicálido; en estos climas son frecuentes las neblinas, las cuales impiden el acceso directo de una concentración alta de humedad en la atmósfera, lo que directamente minimiza las pérdidas de agua en la vegetación.

### Clima, Los Humeros, Puebla

De acuerdo con el estudio realizado por Salgado et al. (2014), la zona de estudio corresponde a los siguientes tipos de clima: *templado húmedo* (con abundante lluvia en verano, con un porcentaje de lluvia mayor al 5 % en invierno), *templado subhúmedo* (con lluvia en verano y un porcentaje de lluvia menor al 5 % en invierno), *semifrío subhúmedo* (con lluvia en verano y un porcentaje de lluvia menor al 5 % en invierno) y *frío* (cuya temperatura del mes más frío es menor de 0 °C). La temperatura media anual es de 14 °C, la temporada de lluvia abarca los meses de abril a octubre, siendo agosto y septiembre los más lluviosos con precipitaciones de 14 a 50 mm (Gráfica 2). La evaporación media anual es de 472 mm/año (Conagua, 2020). De acuerdo con el mapa de unidades climáticas del Instituto

**GRÁFICA 2.** Precipitación por ciclo de lluvia del 2011 a 2019, datos del promedio anual (mm) para la estación meteorológica del municipio de Chignautla, Puebla



Fuente: Elaboración propia con datos de Conagua (2020).

Nacional de Estadística y Geografía (INEGI) escala 1:1 000 000 que utiliza el Sistema de Clasificación Climática de Köppen modificado por Enriqueta García para representar la diversidad climática en la república mexicana, en la caldera Los Humeros, Puebla existen los climas templado subhúmedo C (w2) y de altura E(T)H (INEGI, 2000, 2011).

### **Descripción socioeconómica, Acoculco, Puebla**

Las poblaciones que se han estudiado para la presente investigación forman parte de los ejidos Cruz Colorada, San Francisco Terrerillos y Jonuco Pedernales, todos pertenecientes al municipio de Chignahuapan. Estas comunidades están organizadas en un sistema ejidal, como todo el territorio rural mexicano. Cada núcleo ejidal está dividido en parcelas agrícolas, comunales, escolares y de bosque repartidas entre ejidatarios. La zona de habitación está dividida en solares. Cada ejido está administrado por un comisariado ejidal, un tesorero, un presidente auxiliar, un secretario, juez de paz y un consejo de vigilancia.

La mayoría de los hogares no disponen de drenaje, cuentan con fosas sépticas y letrinas de pozo simple. Aún se encuentran casas con piso de tierra (al 2010 se reportaba que 9 % de las casas-habitación tenían piso de tierra) y 2 % no cuentan con energía eléctrica. En todas las poblaciones hay tendido eléctrico, no hay telefonía fija y las personas cuentan con teléfonos celulares para uso personal. La mayor parte de las comunidades de Acoculco están conectadas entre sí por caminos de terracería por donde circula con regularidad el transporte público hasta Chignahuapan. Los caminos dentro de las comunidades se encuentran en general en malas condiciones y transitan por ahí los vehículos de carga de algunos habitantes, mulas, caballos y algunas carretas. Ninguna población ejidal cuenta con banquetas ni alcantarillado. Se trata de poblaciones mestizas, con una rica tradición culinaria propia del centro del país, consistente en maíz, frijol y chile. Algunos habitantes producen pulque, una bebida derivada del maguey que abunda y da su sello característico a los paisajes de esta región.

## Descripción socioeconómica, Los Humeros, Puebla

De acuerdo con el Consejo Nacional de Evaluación de la Política de Desarrollo Social (Coneval) y al Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), en el año 2010 Chignautla fue uno de los municipios con mayor porcentaje de su población en situación de pobreza. En ese año, 63.3 % de su población total era pobre, es decir, 19 151 habitantes, de los cuales 24.7 % (6 379) estaban en pobreza extrema y 66.69% (12 772) en pobreza moderada. Según la información, observamos un predominio en la población vulnerable por carencias sociales en 77.64 %, de los cuales 42.85 % tiene tres o más carencias sociales. Asimismo, de acuerdo con los indicadores, la mayor carencia social está en el servicio de seguridad social, donde 68.28 % de la población no tiene acceso a este servicio y 40.9 % no tiene acceso a servicios de salud. Existe 31.4 % de rezago educativo, 38.3 % no cuenta con los servicios básicos en las viviendas y hay 19.7 % con problemas de alimentación. Algunos de los recursos de la zona son comedores, escuelas, campos agrícolas y viviendas de material como block y ladrillo.

## Materiales y métodos

En cuanto a la simulación de futuros cambios en el uso del suelo, la investigación ha madurado gradualmente. Los resultados de la simulación informan sobre determinados contaminantes y sus características, patrones temporales y tendencias. Además, los análisis espaciales y temporales de la calidad del agua de los ríos suelen requerir datos fiables a largo plazo para observar las tendencias. La mayoría de los investigadores utilizan métodos estadísticos de regresión lineal múltiple (Kamarudin et al., 2019; Khong y Wahab, 2019) y técnicas basadas en el método de superposición booleana como método de evaluación multicriterio, útiles para realizar operaciones en los atributos temáticos, especialmente en el cálculo de atributos en procesos topológicos de superposición, tanto para sistemas ráster como vectoriales, ya que pueden aplicarse a todo tipo de

datos de cada píxel adjuntos a entidades geográficas en un Sistema de Información Geográfica (SIG). Por lo tanto, además del análisis de la presencia de contaminantes en el medioambiente, la evaluación de la presión de los indicadores es esencial para conocer el nivel de compromiso de los recursos naturales.

En este sentido, el SIG y la Teledetección se presentan como alternativas prometedoras, que permiten la generación de datos con gran potencial para la adecuada gestión de las Unidades de Calidad (UC). La gestión de las UC no es una tarea fácil, ya que implica muchos factores internos y externos. Sin embargo, la gestión de estas unidades se vería inmensamente facilitada por la agregación de datos especializados de los elementos que efectivamente ejercen presión sobre las zonas de conservación. Estos temas son objeto de debate sobre cuánto cuesta flexibilizar o no respetar determinadas leyes medioambientales de cara a un compromiso entre ingresos económicos e impactos en los niveles de calidad de vida del medioambiente (Brancaion et al., 2016; Ferreira et al., 2014; Sugai et al., 2015).

## Escenarios a mesoescala para el sistema ambiental

---

Para los escenarios se consideraron los resultados del monitoreo ambiental de Acozulco en los años 2015-2019 y el de Los Humeros en los años 2018-2019. En el último año en ambos sitios no se pudo completar una de las temporadas por cuestiones relacionadas a la pandemia de COVID-19.

### Análisis geoespacial y multicriterio

El análisis espacial de la información generada para los estudios geocientíficos fue con base en los polígonos de exploración en Acozulco y de aprovechamiento en Los Humeros, Puebla, mismos que son de la Comisión Federal de Electricidad (CFE), y considerando bases de datos espaciales del Sistema de Información Geográfica para confeccionar car-

tografías o mapas descriptivos, según lo propuesto por Carranza (2009) y Cassard et al. (2008).

Se descargó la última versión de la información sobre cubierta vegetal y uso del suelo para el país desde el portal oficial del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI, 2014). Esta información se correlacionó con la diversidad registrada en campo (campañas 2018, 2019) en los sitios de estudio, lo que se fundamentó en la superposición de los datos analógicos recopilados en forma de mapas. Sin embargo, con cierta frecuencia, aun hoy día el análisis se limita a la superposición de los datos digitales para generar nuevos documentos cartográficos de interés en la aplicación para realizar un posterior análisis visual logrando recuperar la información geoespacial por su significado semántico (Bonham-Carter, 1997).

Una nueva forma de caracterizar el análisis numérico de los datos disponibles en caso de los estudios multidisciplinarios es precisamente la exploración de recursos bióticos y abióticos, donde los estudios de fenómenos complejos requieren de la manipulación, no solo de las capas individuales de información, sino también del análisis de las relaciones —especialmente las espaciales— que existen entre ellas, para poder llegar así a obtener los resultados deseados (Bonham-Carter, 1997). Un caso típico para elaborar modelos espaciales predictivos que permitan la incorporación y combinación de las variables relevantes relacionadas, realizados en entorno SIG, incluye, según su base metodológica, desde aquellos que combinan los mapas con sencillas reglas lógicas, aritméticas, estadísticas o probabilísticas, hasta aquellos otros algo más complejos que emplean reglas no lineales.

La propuesta para la selección del indicador ambiental se basa en las características que presenta el área de estudio, determinadas a través de las problemáticas detectadas en el diagnóstico realizado, problemas de desequilibrios ambientales o territoriales que no pueden ser abordados solo desde el punto de vista de procesos naturales, ya que la mayoría de los conflictos se producen por la interacción de fuerzas de diversa naturaleza. La mayoría de las variables utilizadas se basó en trabajos puntuales,

información obtenida de capturas de datos de agua, suelo, fallas, pendiente, ríos, localidades, caminos, represas y salud, muestreados en la continuidad en el tiempo y que permiten la evaluación de la situación actual y de tendencias, además de la comparación entre diferentes localidades, como del apoyo mediante el análisis temporal de imágenes satelitales.

**CUADRO 1.** *Variables involucradas en el análisis de escenarios a mesoescala y sus definiciones*

Indicador	Definición
Biocomplejidad Forestal (BCF)	La Biocomplejidad Forestal describe la condición de la biocomplejidad en bosques y selvas; es la agregación de cuatro subíndices que muestran la condición de la biodiversidad arbórea, la complejidad estructural y el nivel de desarrollo de los rodales forestales. Además, el índice de Biocomplejidad muestra los efectos de la actividad humana, al integrar los valores del índice de Impacto Forestal.
Biodiversidad Forestal (BDF)	La Biodiversidad Forestal describe la condición de la diversidad de las especies arbóreas. Es la integración de indicadores de variación en la riqueza de especies en el estrato arbóreo de los bosques y selvas de México, y compara sus valores en zonas de referencia que muestran condiciones similares de desarrollo en función a variables climáticas homogéneas (zonas de vida). La composición de especies se considera el resultado de las condiciones geoclimáticas de las zonas de vida.
Corredores Bioclimáticos para la Conservación de la Biodiversidad (CBC)	Los Corredores Bioclimáticos para la Conservación de la Biodiversidad tienen como objetivo identificar corredores climáticos entre fragmentos de vegetación nativa en mejor estado de conservación usando como variable climática a la evapotranspiración reciente. En el marco de colaboración de la Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (Conabio) con el proyecto GEF-Resiliencia, se identificaron las rutas de 'menor costo', es decir, aquellas que consideran el gradiente climático, el impacto humano y la distancia euclidiana entre fragmentos de vegetación nativa.

Impacto Forestal (IF)	El Impacto Forestal es un indicador cuantitativo del impacto antropogénico en los bosques y selvas, y de los efectos de la actividad humana en la reducción de la biocomplejidad.
Índice de Integridad Ecológica (IIE) e Índice de Degradación Ecológica (IDE)	El Índice de Integridad y el de Degradación Ecológica de México muestran la tendencia global del deterioro de ecosistemas y de la pérdida de especies. Los resultados de la actividad humana durante las últimas décadas se han traducido notablemente en la crisis de la biodiversidad y en la pérdida de la condición íntegra de los ecosistemas. Este es un indicador sintético que integra el papel de la biodiversidad en el mantenimiento a largo plazo de los procesos ecológico-evolutivos.
Índice de Estabilidad Climática 2015-2039 RCP 8.5 (EC)	El Índice de Estabilidad Climática tiene como propósito identificar áreas de estabilidad climática ante escenarios de cambio climático. El Índice de Estabilidad Climática desarrollado está determinado por la superposición de las zonas de vida de Holdridge definidas por condiciones climáticas en el presente y futuras.
Índice de Impacto Antropogénico (IIA)	El Índice de Impacto Antropogénico en la biodiversidad terrestre tiene como objetivo desarrollar un indicador sintético que integre el papel de la biodiversidad para mantener a largo plazo procesos ecológico-evolutivos. Este índice da cuenta de los resultados de la actividad humana durante las últimas décadas, que se han traducido notablemente en la crisis de la biodiversidad y en la pérdida de la condición íntegra de los ecosistemas. Este se generó como un elemento para el cálculo del Índice de Integridad Ecológica, que permite el cálculo del Índice de Capital Natural, utilizando un modelo y datos generados para México.
Índice de Impacto Humano (IIH)	El Índice de Impacto Humano en la biodiversidad terrestre de México se basa en el marco teórico del Modelo Global de Biodiversidad (GLOBIO3, por sus siglas en inglés). Se desarrolló para evaluar los cambios en la biodiversidad inducidos por el hombre y permite evaluar los cambios temporales en el estado de conservación de la biodiversidad terrestre a diferentes escalas. Las principales presiones y factores de amenaza que incorpora el modelo GLOBIO3 son: uso del suelo, infraestructura, fragmentación, cambio climático y deposición de nitrógeno. La adaptación para México incluye como factores de presión y amenaza: el uso del suelo, la infraestructura de carreteras y la fragmentación, lo anterior con base en datos del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI, 2021).

Fuente: Elaboración propia con datos de Conabio (2020).

Con base en el reporte técnico (sin publicar) del paquete de trabajo 9 del proyecto GEMex (Jolie et al., 2021) se desarrollaron tres escenarios a mesoescala (escenario actual, optimista y pesimista), en donde se involucraron nueve variables desarrolladas a nivel país publicadas por la Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (Conabio).

Las variables involucradas son: Biocomplejidad Forestal (BCF), Biodiversidad Forestal (BDF), Corredores Bioclimáticos (CBC), Impacto Forestal (IF), Impacto Antropogénico (IIA), Índice de Degradación Ecológica (IDE), Índice de Impacto Humano (IIH), Índice de Integridad Ecológica (IIE) e Índice de Estabilidad Climática (EC) al año 2039, de acuerdo con las definiciones del Cuadro 1.

Las variables elegidas dan cuenta de la condición actual del sitio, que permite crear un escenario inicial de la condición actual del contexto ambiental y el impacto que ha sufrido, considerando como proxy a la cubierta de vegetación, desde la perspectiva funcional forestal, la diversidad biológica y las condiciones climáticas que permiten el desarrollo de ambas. A partir del escenario actual se construyeron dos escenarios, uno optimista y uno pesimista, que se desarrollan con base en los posibles impactos de aprovechamiento de los recursos o hacia los recursos, por motivo de la ejecución del proyecto en la zona. Las nueve variables utilizadas indican la condición del sitio en estudio, algunas señalan condiciones positivas o favorables y otras condiciones negativas. Todas las variables tienen una resolución espacial nativa de 1 km<sup>2</sup> y se normalizaron (valor de entre 0 y 1) utilizando la siguiente ecuación:

$$\text{Normalización} = (X - X_{\min}) / (\max - \min) \quad (1)$$

### **Desarrollo de los escenarios**

Para el desarrollo de los escenarios se creó un contexto espacial de tipo malla, que se integra con celdas cuadradas de 1 km x 1 km, con-

gruente con la resolución de la información espacial de las variables en análisis. Esta cuadrícula se delimitó para el área de estudio y una zona aledaña (buffer) de 2 km, que permitió incluir a la mayoría de las localidades cercanas a los límites del polígono del área de estudio (Mapas 2, 3 y 4). Para la construcción del *escenario actual*, las variables se combinaron según las condiciones del sistema ambiental que representan, y de acuerdo con la siguiente ecuación, que se ha denominado Indicador del Sistema Ambiental (ISA):

$$ISA = (BCF+BDF+CBC+IIE) - (IF+IDE+IIH+IIA) * EC \quad (2)$$

Para el desarrollo de los escenarios optimista y pesimista se modificó el valor de las variables; así, para el *escenario optimista* a la variable EC se le asignó el valor de 1, es decir, se considera que se mantienen las condiciones ambientales actuales al año 2039, se podría considerar que las condiciones ambientales son normales o sin alteración respecto a las actuales. Se disminuye el valor de las variables que restan valor al ISA (IF, IDE, IIH, IIA), para esto se resta a cada variable el valor promedio de esa misma variable dentro el área de estudio. En contraste, para este escenario se aumenta el valor de la IIE, que es una de las variables que suman valor al ISA; para esto se le suma su valor promedio dentro del área de estudio. El resto de las variables (BCF, BDF, CBC) para este escenario se considera que no tendrían cambios, debido a la temporalidad (largo plazo) de los fenómenos que cambiarían su valor. La ecuación utilizada para la construcción de este escenario es la siguiente:

$$ISA_{\text{optimista}} = ("BCF" + "BDF" + "CBC" + ("IIE" + 0.2270)) - ((("IF"-0.1845) + ("IDE"-0.7800) + ("IIH"-0.8718) + ("IIA"-0.1828)) * 1 \quad (3)$$

Para el *escenario pesimista*, a la EC se le asignó un valor de 0.5, es decir, se considera que las condiciones ambientales cambiarán 50 % más de lo estimado por el modelo de cambio utilizado para el cálculo de la variable EC al 2039. Para este escenario se aumenta el valor de las variables que restan valor al ISA (IF, IDE, IIH, IIA), utilizando como dimensión del cambio el valor promedio actual para cada variable dentro del área de

estudio. También, en este escenario se disminuye el valor de cada una de las variables que suman valor al ISA (BCF, BDF, CBC, IIE) y para esto se les resta el valor promedio de cada una de las variables. La ecuación utilizada para la construcción de este escenario es la siguiente:

$$\begin{aligned} \text{ISA}_{\text{pesimista}} = & ((\text{"BCF"}-0.3093) + (\text{"BDF"}-0.3071) + (\text{"CBC"}-0.5227) \\ & + (\text{"IIE"}-0.2207)) - ((\text{"IF"}+0.1845) + (\text{"IDE"}+0.7800) \\ & + (\text{"IIH"}+0.8718) + (\text{"IIA"}+0.1828)) * 0.5 \quad (4) \end{aligned}$$

Se extrajo la información de cada variable, para posteriormente construir los escenarios. También se obtuvieron los promedios de cada variable dentro de la zona de estudio (Cuadro 2), para poder ejecutar las ecuaciones descritas anteriormente. Estos valores se obtuvieron de la aplicación de las ecuaciones anteriores y sirvieron para alimentar el SIG.

**CUADRO 2.** *Valores promedio para cada variable dentro del área de estudio*

Variable	Valor promedio en Acoculco	Valor promedio en Los Humeros
BCF	0.3093	0.2679
BDF	0.3071	0.1975
CBC	0.5227	0.3709
IIE	0.2207	0.1967
IF	0.1815	0.1519
IDE	0.7800	0.7921
IIH	0.8718	0.8434
IIA	0.1828	0.0503
EC	0.9105	0.8486

Fuente: Elaboración propia.

## Escenarios a microescala para el sistema ambiental

Existen variados procedimientos que pueden ser aplicados a esta estructura de datos espaciales, denominados como modelos cartográficos, especializados con mayor aptitud para las estructuras ráster (DeMers, 2001) mediante procedimientos de superposición cartográfica. El mayor avance en el modelado cartográfico lo constituyen las denominadas técnicas de evaluación multicriterio, las cuales amplían las posibilidades de trabajo hacia la obtención de resultados como escenarios de posibilidades a futuro, que están altamente vinculados a los procedimientos subjetivos necesarios en el funcionamiento de las metodologías que apuntan a lograr niveles superiores de objetividad. Cabe destacar aquí que, en la for-

mación de factores, mediante la selección de variables, sus tratamientos tendientes hacia la generación de factores y la determinación de diferentes formas de combinación, el análisis se encaminó hacia la búsqueda de resultados. Las formas de vinculación se denominan reglas de decisión y su evaluación. Es posible lograr resultados por procedimientos booleanos por suma (escalonamiento del nivel de riesgo sin compensación).

La elección de los criterios es determinante ya que, según las variables incluidas, el resultado final obtenido puede cambiar considerablemente. Es importante tener en cuenta la existencia de dos tipos de criterios, según la naturaleza de la variable: los condicionantes correspondientes a variables de naturaleza continua como factores y por tanto se tratan en la fase de estandarización siguiendo los principios de la lógica difusa (Gale y Atkinson, 1979), mientras que las variables discretas constituyen restricciones y su funcionalidad en el método puede encuadrarse en los principios de la lógica booleana. Es necesario establecer un sistema de estandarización, dado que las variables originales se expresan en unidades de medida diferentes, con rangos bien distintos y con una amplia gama de posibilidades de interpretación en función de la representatividad o adecuación para un objetivo concreto (Eastman, 2001).

### **Análisis geoespacial y multicriterio**

La base de este tipo de análisis fue la misma descrita en la metodología de los escenarios de mesoescala. La evaluación multicriterio permite considerar que los factores tienen importancias relativas distintas. Por ello, asumen unos pesos generados a partir de una serie de comparaciones por pares, en una matriz simétrica, con la que se mide la importancia relativa de cada factor en comparación con el resto de los factores. Una vez identificadas las variables del análisis de evaluación multicriterio se comienza con una información básica en formato cartográfico y se procede a la preparación de criterios para realizar los procedimientos de evaluación. Es aquí donde los factores y restricciones se tratan de forma diferente. De esta manera, con independencia de las unidades de medida

iniciales y del recorrido de cada variable, se generan mapas en los que la variable es sustituida por un determinado valor de adecuación (Heikkilä et al., 2003; Jiang y Eastman, 2000).

Mediante la superposición ponderada se basó en la suma de cada capa de entrada la selección de las variables por un factor de ponderación, sus tratamientos tendientes hacia la generación de factores y restricciones, y la determinación de diferentes formas de combinación, por lo que el procesamiento geoespacial del modelo cartográfico se basó en la asignación de códigos numéricos enteros a las categorías a través de la técnica de la reclasificación de cada una de las capas temáticas o indicadores en una escala de 1 al 5, que indica su importancia en el modelo, y la posterior suma de las capas modificadas, introduciendo los ráster de entrada para crear ráster de salida (Bonham-Carter, 1994), los cuales se conjugaron a fin de obtener un valor único luego de la combinación de las mismas.

Posteriormente se sumaron los distintos mapas reclasificados para obtener los mapas de vulnerabilidad a una escala cuyos rangos oscilaron de 0 a 27. Obtenidos estos mapas, se aplicó una nueva reclasificación con escala de 1 a 5 que permitió la categorización final de los niveles de vulnerabilidad ambiental, que indica su importancia en el modelo.

En esta sección se presenta toda la información diagnóstica a partir de la generación de los componentes e indicadores, por cada una de las variables analizadas (Cuadro 3). Dicha información comprende las variables consideradas con los indicadores que se obtuvieron y las referencias en donde se puede consultar la metodología seguida.

A las resultantes de cada variable analizada se les asignaron diferentes valores de ponderación en función del grado de influencia sobre la distribución de las variables (Cuadro 4), cuya finalidad es llevar un control de ponderación según el criterio de experto, el cual indica el valor que se asigna a cada variable con base en su importancia en el área de es-

tudio con respecto a la zona de estudios, corresponde al peso o el valor de escala que se le asigna a cada rango de la variable.

Cada una de las variables genera su respectivo mapa de pronóstico y, a partir de sus combinaciones, empleando los métodos de integra-

**CUADRO 3.** *Indicadores utilizados para el análisis*

Núm.	Componente (variables)	Indicadores	Referencia metodológica
1	<b>Hidrología y pendientes</b>	Cuencas y subcuencas hidrológicas Modelo digital de elevación Pendientes Geomorfología	Bannari et al., 2017; Dano et al., 2019; Rezaei et al., 2019; Wang y Qiu, 2017; Youssef et al., 2016.
2	<b>Erosión</b>	Factor K – Erodabilidad del suelo Factor C – Cobertura y manejo del suelo Factor LS – Longitud y gradiente de la pendiente Factor R – Erosividad de la lluvia Factor P – Prácticas de conservación Materia orgánica del suelo pH del suelo Riesgo por erosión hídrica actual del suelo Riesgo por erosión hídrica potencial del suelo	Arnoldus, 1977; Auerswald et al., 2014; Besteiro y Delgado, 2011; Delgado, 2020; Fick y Hijmans, 2017; Huang y Chen, 2022; Majhi et al., 2021; Wischmeier y Dwight, 1978.
3	<b>Servicios ambientales</b>	Servicios de provisión o abastecimiento Servicios de regulación Servicios culturales o de información Modelo de Valoración Económica de los Servicios Ecosistémicos	De Bolós y Gómez Ortiz, 2004; Gómez-Orea, 1978; Hansen et al., 2010; Jenerette y Wu, 2001; Metzger, 2008; Nassauer, 1995; Peters et al., 2013; Winter, 2001.
4	<b>Socioeconómicos</b>	Uso de energía en los hogares Conducta sustentable Factores de relevancia social Vocación económica Ingresos del hogar Gastos en el hogar Percepción de impactos	González-Acevedo y Parés-Olguín, 2016; Lozada, 2019; Manchado Garabito et al., 2009; Salgado, 2007.

5	<b>Calidad de suelo</b>	Parámetros fisicoquímicos Concentraciones de elementos mayores y trazas Factor de enriquecimiento Índice de geoacumulación Factor antropogénico	Adebowale et al., 2009; Barbieri, 2016; Ekengele et al., 2017; Igwe et al., 2014; Lawson y Winchester, 1979; Müller, 1979; Pérez Mora, 2021; Turekian y Wedepohl, 1961; Zhang et al., 2002.
6	<b>Calidad de agua</b>	Parámetros fisicoquímicos importantes Concentraciones de nutrientes disueltos y de elementos químicos mayores y traza de importancia ambiental Índice de calidad de agua	CCME, 2003; Chen et al., 2020; Piper, 1945; Tiwari et al., 2015; UNESCO, 2007; USEPA, 1989, 2018; WHO, 2011.

Fuente: Elaboración propia, citas mostradas en la columna de referencia metodológica.

**CUADRO 4.** Pesos para la superposición ponderada de las variables

Ponderación	Variables	Rangos (%)	Valor
5	Agua	0 - 44	5
		45 - 64	4
		65 - 79	3
		80 - 94	2
		95 - 100	1
5	Suelo	0 - 2	1
		2 - 5	2
		5 - 20	3
		20 - 40	4
		40 - 1000	5
5	Pendiente	0 - 11.93	1
		11.93 - 23.86	2
		23.86 - 35.79	3
		35.79 - 47.22	4
		47.22 - 60.00	5
1	Fallas	0 - 1	0 - 1
1	Río	0 - 1	0 - 1
1	Localidad	0 - 1	0 - 1
1	Carretera	0 - 1	0 - 1
1	Camino vecinal	0 - 1	0 - 1
1	Represa	0 - 1	0 - 1
1	Salud	0 - 1	0 - 1

Fuente: Elaboración propia.

**CUADRO 5.** Rangos de ponderación para los mapas pronósticos

Rango (%)	Ponderación
80 - 100	Sin polución, estado natural
60 - 80	Polución y eutrofización leve
40 - 60	Polución y eutrofización moderada
20 - 40	Polución y eutrofización fuerte
0 - 20	Polución y eutrofización muy fuerte

Fuente: Elaboración propia.

ción de datos espaciales (superposición ponderada y lógica booleana), se obtuvieron los mapas de pronóstico; estos permiten visualizar las áreas favorables de aquellas sin interés prospectivo. A cada uno de los mapas pronósticos se le determinó su rango de ponderación indicando el grado de favorabilidad y los rangos de ponderación (Cuadro 5). Se representa un degradado de colores que van desde el rojo, que simboliza el valor cero (0 %), considerado como áreas no favorables, hasta el color verde con un valor de 100 por ciento, que representa que la región de estudio se encuentra en estado natural con pendientes muy bajas.

## Resultados y discusión

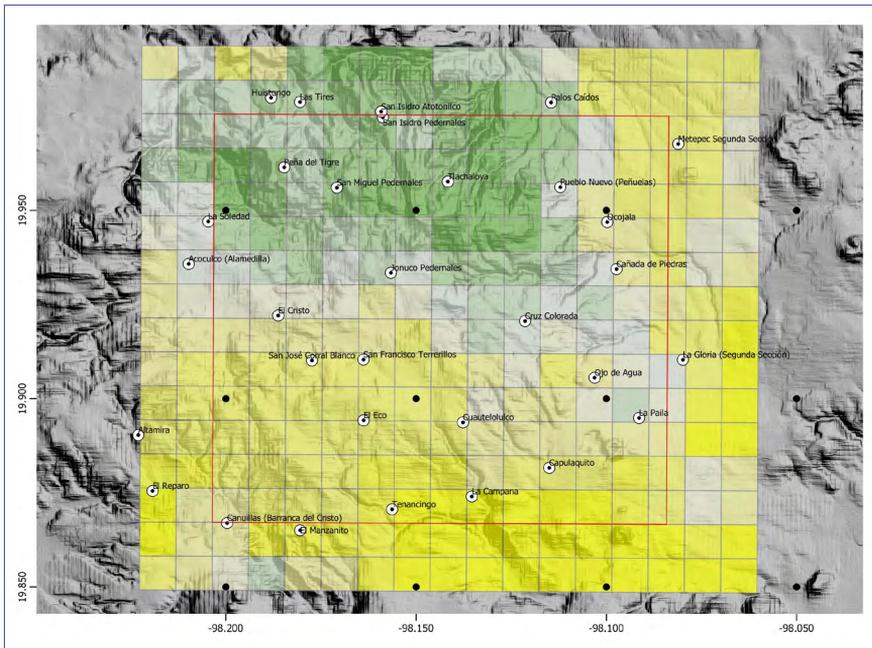
### Escenarios a mesoescala para el sistema ambiental

#### *Zona de exploración geotérmica, Acoculco, Puebla*

El escenario actual que representa las condiciones de naturalidad, importancia y deterioro del sistema ambiental en la zona de estudio se observa en el Mapa 2. Aquí se muestra que la parte norte central del área de estudio es la que tiene los valores más altos para este indicador, zonas en donde se encuentra la cubierta de vegetación y uso de suelo de tipo bosque de pino y vegetación secundaria, siendo las zonas sur y este las que muestran valores negativos, es decir, presentan un deterioro en el sistema ambiental, dado que su valor lo obtuvieron principalmente de las variables que restan (IF, IDE, IIH e IIA) dentro de la ecuación para el ISA. Estas zonas que se muestran con deterioro corresponden a la zona con cubierta de suelo y vegetación de agricultura de temporal, que en el análisis de diversidad presentó buena condición respecto al número de registros y especies.

El escenario optimista representa condiciones de naturalidad, importancia y deterioro del sistema ambiental que se mejorarían por la presencia y ejecución del proyecto. En el Mapa 3 se muestra que, para este escenario, el área de condiciones favorables se mantiene casi similar en

**MAPA 2.** Se muestra el escenario actual en la zona de estudio, considerando las nueve variables en estudio. En amarillo se representan los sitios con valores negativos para el ISA, los colores grises son valores cercanos a cero y los verdes valores positivos



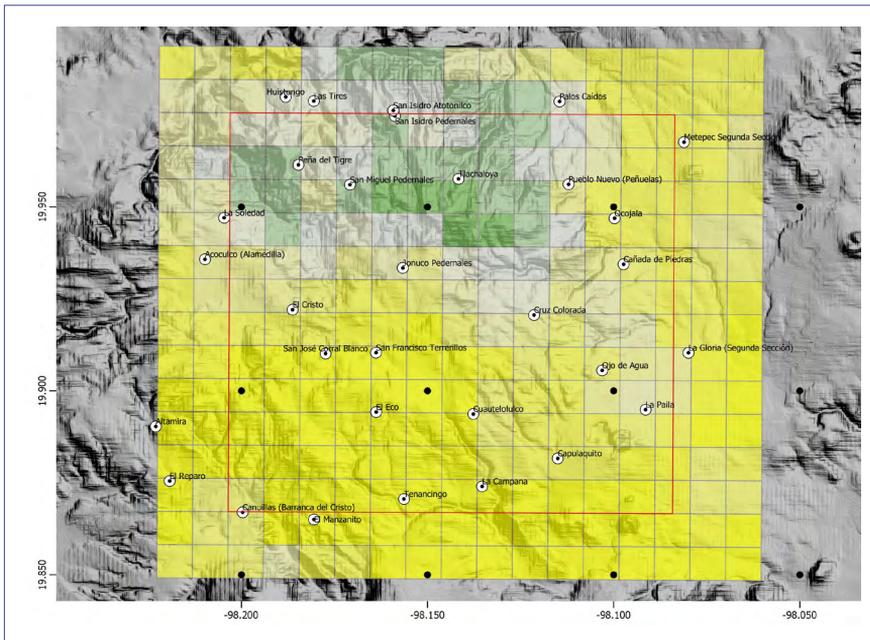
Fuente: Elaboración propia.

comparación con el escenario actual (parte norte central del área en estudio), apareciendo una amplia zona central de valores cercanos a cero y tonos verdes claro, es decir, bajo un escenario optimista, el sistema gana y se pierde de manera casi similar.

Solo la parte sur de la zona en análisis presenta condiciones con valores negativos para el ISA, lo que indica que este escenario, si se promueve, puede resultar favorable para la mejora de las condiciones de la mayor parte del sistema ambiental y para la mayoría de las celdas en donde se encuentran asentamientos humanos; solo tres poblaciones (La Campana, El Reparó y Tenancingo) permanecen en zonas con condiciones no



**MAPA 4.** Se muestra el escenario pesimista para el desarrollo del proyecto, considerando las nueve variables en estudio. En amarillo se representan los sitios con valores negativos para el ISA, los colores grises representan sitios con valores cercanos a cero y los tonos verdes sitios con valores positivos para el ISA



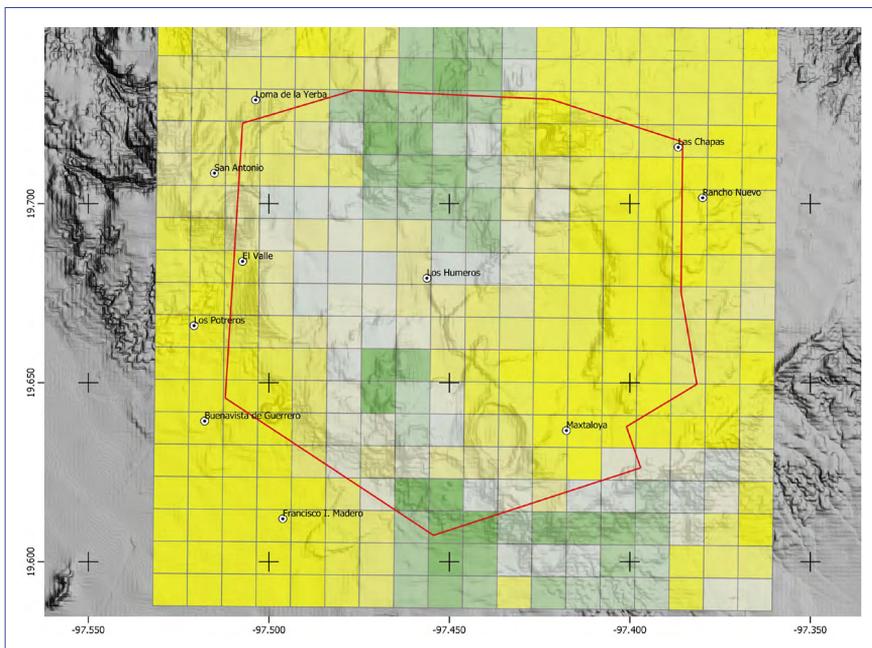
Fuente: Elaboración propia.

La mayor parte de la zona en estudio se muestra con valores negativos y solo una pequeña porción, alrededor de la zona favorable, presenta valores cercanos a cero. Para este escenario la zona cambia dramáticamente a valores predominantemente bajos, lo que indica que el desarrollo de actividades y del proyecto sin considerar la protección de la cubierta de vegetación, la pérdida del valor del bosque y un mayor impacto por las actividades del hombre, pone en riesgo la permanencia y calidad del sistema ambiental.

### Zona geotermoeléctrica, Los Humeros, Puebla

En el Mapa 5 se presenta el escenario actual, que muestra las condiciones de naturalidad, importancia y deterioro del sistema ambiental en la zona de estudio. Exhibe que la parte central de norte a sur del área de estudio es la que tiene los mejores valores para este indicador, siendo las zonas norte y sur extrema las que presentan los mejores sitios. Las zonas este y oeste del área de estudio presentan valores negativos, lo que indica que actualmente los sitios tienen presión de uso y deterioro.

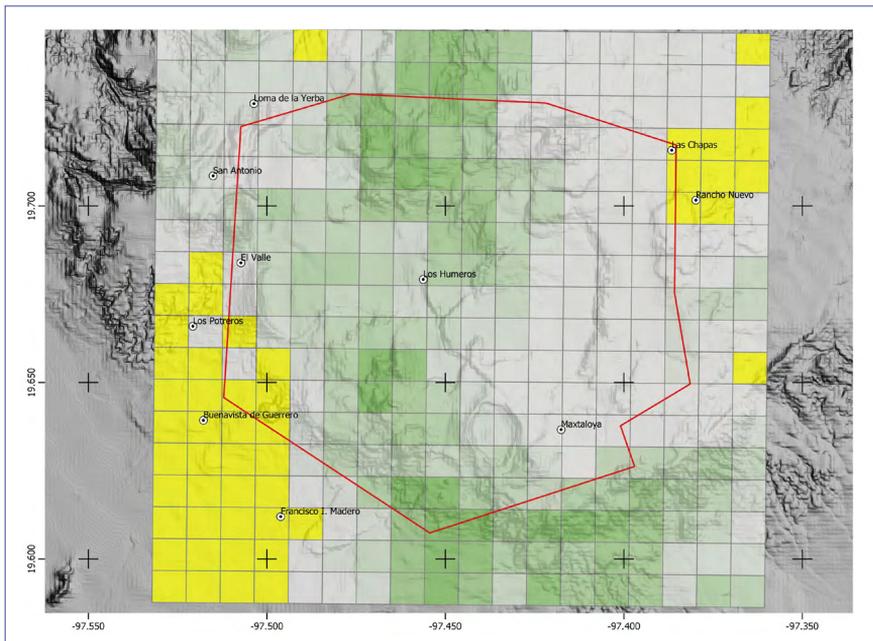
**MAPA 5.** Se muestra el escenario actual en la zona de estudio, considerando las nueve variables en estudio. En amarillo se representan los sitios con valores negativos para el ISA, los colores grises los valores cercanos a cero y los verdes valores positivos



Fuente: Elaboración propia.

El escenario optimista representa condiciones de naturalidad, importancia y deterioro del sistema ambiental que mejorarían por la presencia y ejecución del proyecto. En el Mapa 6 se muestra que, para este escenario, el área de condiciones favorables se mantiene casi similar al escenario actual (parte norte y sur-central del área en estudio), apareciendo una amplia zona de valores cercanos a cero y tonos verdes claro, es decir, bajo una tendencia optimista, casi la totalidad del área de estudio presenta valores positivos o cercanos a cero, lo que implica que no hay deterioro ambiental o se está deteniendo su avance.

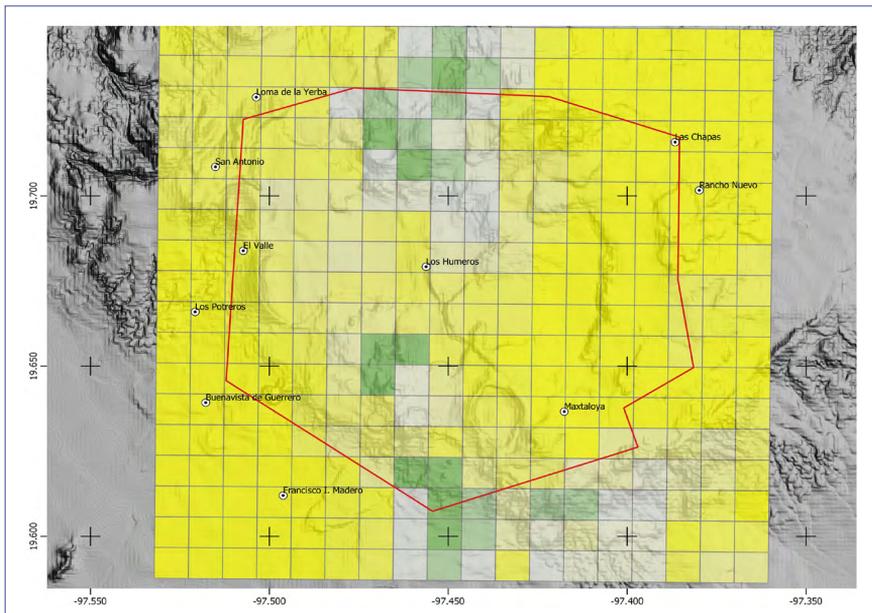
**MAPA 6.** Se muestra el escenario optimista para el desarrollo del proyecto, considerando las nueve variables en estudio. En amarillo se representan los sitios con valores negativos para el ISA, los colores grises representan sitios con valores cercanos a cero y los tonos verdes sitios con valores positivos para el ISA



Fuente: Elaboración propia.

El escenario pesimista representa condiciones de naturalidad, importancia y deterioro del sistema ambiental que se agravan por la presencia y ejecución del proyecto. En el Mapa 7 se muestra que, para este escenario, el área de condiciones favorables se reduce dramáticamente a unas pequeñas zonas en las partes del norte y sur del área en estudio; si se considera que cada cuadrícula mide un km<sup>2</sup>, el área con condiciones favorables queda reducida a aproximadamente 12 km<sup>2</sup>, precisamente en donde se pretende realizar el proyecto. La mayor parte de la zona se muestra con valores negativos. La porción este del área de estudio no se presenta muy diferente al escenario actual.

**MAPA 7.** Se muestra el escenario pesimista para el desarrollo del proyecto, considerando las nueve variables en estudio. En amarillo se representan los sitios con valores negativos para el ISA, los colores grises representan sitios con valores cercanos a cero y los tonos verdes sitios con valores positivos para el ISA



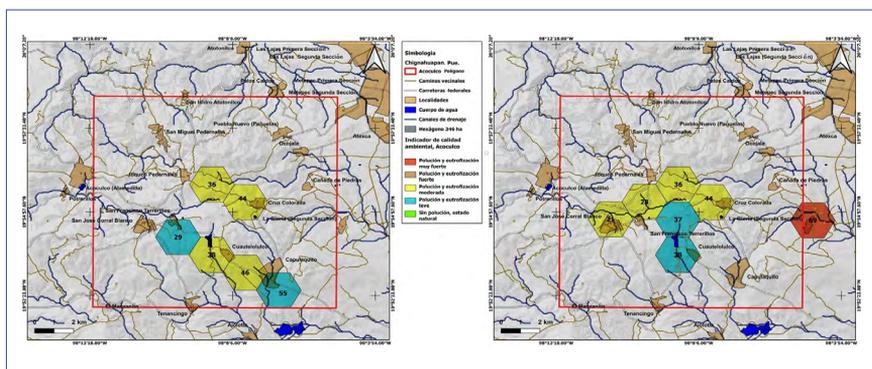
Fuente: Elaboración propia.

## Escenarios a microescala para el sistema ambiental

### Zona de exploración geotérmica, Acoculco, Puebla

En el Mapa 8a y 8b se representan las combinaciones de las zonas agrícolas muestreadas, asumiendo como resultante las áreas de potencial conflicto de polución de leve a moderada para la temporada de secas donde la superficie de los hexágonos presentados brinda los valores de 20.76 km<sup>2</sup> para el año 2015, mientras que para la época de lluvias del 2016 fue de 24.22 km<sup>2</sup>, donde la precipitación media anual para estos intervalos estuvo entre los 85 y 90 mm, con una mayor presencia de agua en los diferentes drenajes pluviales, dentro de los 150 km<sup>2</sup> del área determinada para el polígono de exploración de la CFE, con un predominio en la zona central. La superficie total con área de potencial conflicto, como aproximación cuantitativa, localizada con mayor presencia fue en suelos más fértiles como sustento de una importante producción agrícola, y también la de importantes cuerpos de agua en un mosaico de paisajes apto para la preservación de la diversidad.

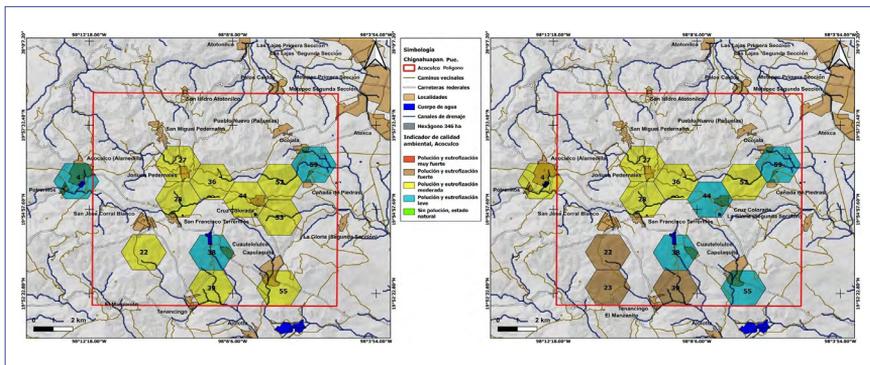
**MAPA 8a Y 8b.** Mapa reclasificado por el método booleano en la temporada de secas 2015 (izquierda) y de lluvias 2016 (derecha) para Acoculco, Puebla



Fuente: Elaboración propia.

Las asociaciones espaciales que presentan la base de la interpretación, observadas en los resultados del Mapa 9a y 9b que representan la época de muestreo del 2017 y las combinaciones de las zonas agrícolas muestreadas, obtuvieron como resultante las áreas de potencial conflicto de polución de leve a moderada para las dos temporadas de secas y lluvias donde la superficie de los hexágonos presentados brinda los valores de 38.06 km<sup>2</sup> dentro del polígono y 3.36 km<sup>2</sup> fue la misma superficie en ambas zonas de estudio, donde la precipitación media anual para esta temporalidad estuvo entre los 85 mm, con una mayor presencia de agua en los diferentes drenajes pluviales, dentro de los 150 km<sup>2</sup> del área determinada para el polígono de exploración de la CFE, con predominio en la zona central.

**MAPA 9a y 9b.** Mapa reclasificado por el método booleano en la temporada de secas (izquierda) y lluvias (derecha) para Acoaculco, Puebla, 2017

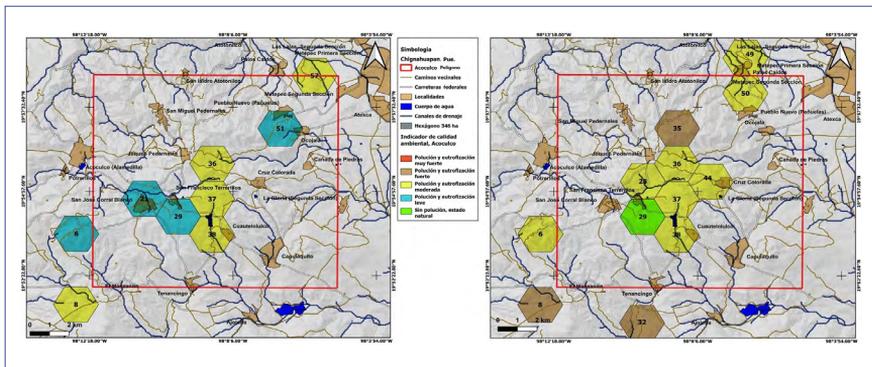


Fuente: Elaboración propia.

La superficie total con área potencial de conflicto, como aproximación cuantitativa, localizada con mayor presencia fue en suelos más fértiles como sustento de una importante producción agrícola, bosque y también la de importantes cuerpos de agua en un mosaico de paisajes apto para la preservación de la diversidad.

Las asociaciones espaciales que presentan la base de la interpretación, observadas en los resultados del Mapa 10a que representan las combinaciones de las zonas agrícolas muestreadas obtuvieron como resultado las áreas de potencial conflicto de polución de leve a moderada para la temporada de secas donde la superficie de los hexágonos presentados brinda los valores de 20.76 km<sup>2</sup> dentro del polígono. El Mapa 10b corresponde a la época de lluvias donde la superficie de los hexágonos brinda los valores de 27.68 km<sup>2</sup> dentro del polígono, donde la precipitación media anual para esta temporalidad estuvo entre los 85 mm que representan la época de muestreo del 2018, con mayor presencia de agua en los diferentes drenajes pluviales, dentro de los 150 km<sup>2</sup> del área determinada para el polígono de exploración de la CFE, presentando un predominio en las zonas central, sur y oeste.

**MAPA 10a Y 10b.** Mapa reclasificado por el método booleano en la temporada de secas (izquierda) y lluvias (derecha) para Acoaculco, Puebla, 2018

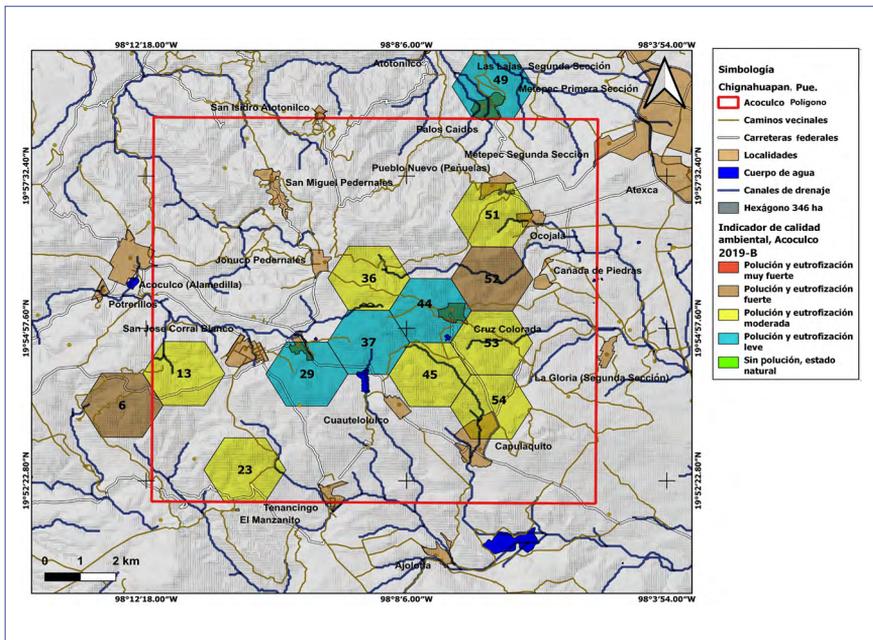


Fuente: Elaboración propia.

La superficie total con área potencial de conflicto, como aproximación cuantitativa, localizada con mayor presencia fue en suelos más fértiles como sustento de una importante producción agrícola, de bosque y también la de importantes cuerpos de agua en un mosaico de paisajes apto para la preservación de la diversidad.

Las asociaciones espaciales que presentan la base de la interpretación, observadas en los resultados del Mapa 11 que representan las combinaciones de las zonas agrícola muestreadas, obtuvieron como resultante las áreas de potencial conflicto de polución de leve a moderada para la temporada de lluvias, donde la precipitación media anual fue de 77 mm para el año 2019 con una presencia en escorrentías por los diferentes drenajes, dentro de los 150 km<sup>2</sup> del polígono de exploración de la CFE y con predominio en la zona central. La superficie total con área potencial de conflicto, como aproximación cuantitativa, localizada con mayor presencia fue en suelos más fértiles como sustento de una importante producción agrícola, de bosque y también la de importantes cuerpos de agua en un mosaico de paisajes apto para la preservación de la diversidad.

**MAPA 11.** Mapa reclasificado por el método booleano en la temporada de lluvias 2019 para Acozulco, Puebla

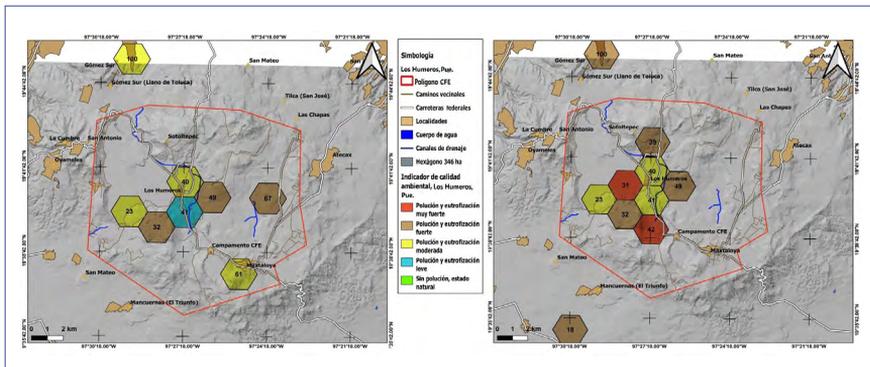


Fuente: Elaboración propia.

### Zona geotermoelectrica, Los Humeros, Puebla

La suma de la tarea metodológica realizada a partir del modelado a través de la combinatoria de categorías de las diferentes variables para el modelo que se representan por la suma de varias capas de información (SHP) en este trabajo, donde los resultados corresponden a la definición de criterios, obtención de mapas para cada objetivo parcial y el resultado final, con las asociaciones espaciales que presentan la base de la interpretación, observadas en los resultados del Mapa 12a y 12b que representan la época de muestreo del 2018 para Los Humeros de las zonas agrícola y de reforestación muestreados, obtuvo como resultante las áreas de potencial conflicto de polución de leve a fuerte para la temporada de secas donde la superficie de los hexágonos presentados brinda los valores de 24.22 km<sup>2</sup> dentro del polígono y 3.46 km<sup>2</sup> en la zona sur de polígono, encontrando un nivel de leve a fuerte. Para la temporada de lluvias la superficie de los hexágonos brinda los valores de 27.86 km<sup>2</sup> dentro del polígono y 6.92 km<sup>2</sup> en la zona sur y norte del polígono, presentando una polución de moderada a muy fuerte, donde la precipitación media anual para esta temporalidad fue de 1 mm, presentando suelos con carácter de desertificación dentro de los 150 km<sup>2</sup> del área determinada para el polígono de explotación de la CFE, con predominio en la zona central del área de estudio.

**MAPA 12a Y 12b.** Mapa reclasificado por el método booleano en la temporada de secas (izquierda) y lluvias (derecha) para Los Humeros, Puebla, 2018

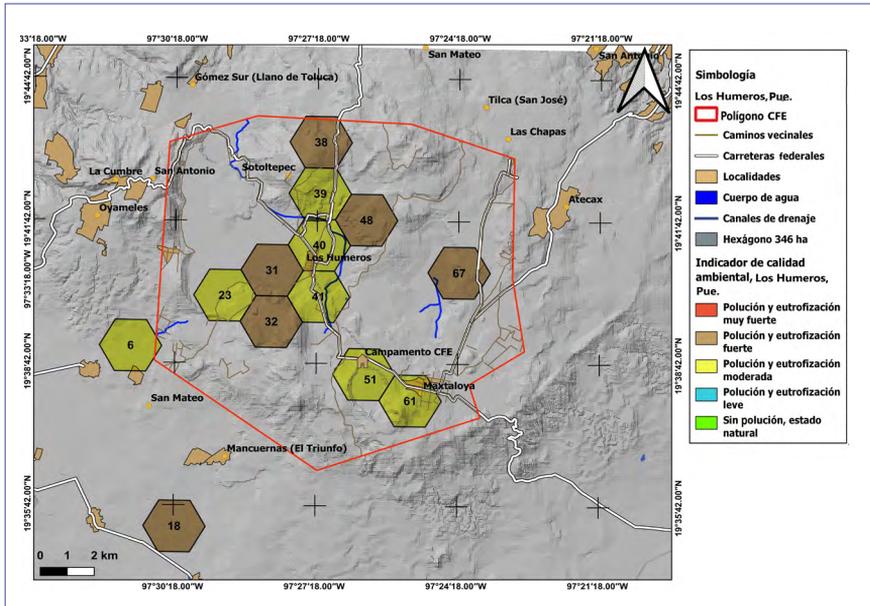


Fuente: Elaboración propia.

La superficie total con área potencial de conflicto, como aproximación cuantitativa, localizada con una mayor presencia fue en suelos más fértiles como sustento de una importante producción agrícola, bosque y también la de importantes cuerpos de agua en un mosaico de paisajes con un riesgo para la preservación de la diversidad por la falta de agua superficial.

La suma de la tarea metodológica realizada a partir del modelado a través de la combinatoria de categorías de las diferentes variables para el modelo que se representan por la suma de varias capas de información (SHP) en este trabajo, donde los resultados corresponden a la definición de criterios, obtención de mapas para cada objetivo parcial y el resultado final, con la asociaciones espaciales que presentan la base de la interpretación, observadas en los resultados del Mapa 13 que representan la época de muestreo del 2019 para Los Humeros de las zonas agrícola y de reforestación muestreados, obtuvo como resultante las áreas de potencial conflicto de polución de moderado a fuerte para la temporada de lluvias donde la superficie de los hexágonos brinda los valores de 38.06 km<sup>2</sup> dentro del polígono y de 6.92 km<sup>2</sup> en la zona oeste y sureste del polígono, con una polución de moderada a fuerte, donde la precipitación media anual para esta temporalidad fue menor a 1 mm, presentando suelos con carácter de desertificación y problemas en la calidad del agua dentro de los 150 km<sup>2</sup> del área determinada para el polígono de explotación de la CFE, con un predominio en la zona central del área de estudio. La superficie total con área potencial de conflicto, como aproximación cuantitativa, localizada con mayor presencia fue en suelos con características de desertificación por falta de agua superficial como sustento de una producción agrícola, bosque y también la de importantes cuerpos de agua en un mosaico de paisajes con un riesgo para la preservación de la diversidad.

**MAPA 13.** *Mapa reclasificado por el método booleano en la temporada de lluvias para Los Humeros, Puebla, 2019*



Fuente: Elaboración propia.

## Estrategias de manejo para las afectaciones ambientales, sociales y económicas

La incorporación y seguimiento de estas recomendaciones permitirán, mediante procesos participativos y el fortalecimiento local con enfoque de género, adaptación al cambio climático, manejo y gestión integral de cuencas y restauración de ecosistemas degradados, lo cual contribuirá a la protección y conservación de zonas de recarga hídrica, garantizar calidad y cantidad de agua con fines de uso múltiple de la subcuenca, así como a la diversificación de cultivos, a disminuir los índices de erosión hídrica de los suelos, a mejorar la condición socioeconómica y calidad de vida y a disminuir el riesgo de desastres incrementado por el cambio climático y la degradación ambiental.

Para la zona en estudio, lo anterior se podría implementar a través de una figura administrativa como las Áreas Destinadas Voluntariamente a la Conservación (ADVC). Dichas áreas están reconocidas por la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (Semarnat, 2019). La promoción de una o varias ADVC asociadas se puede realizar por la CFE o un consorcio integrado por los tenedores de la tierra, usuarios de la zona y la CFE.

El artículo 46 de la Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente (LGEEPA) considera a las ADVC como parte de las Áreas Naturales Protegidas (ANP) de competencia de la federación. Según el artículo 55 bis de esta misma ley, estas ADVC pueden presentar cualquiera de las características biológicas y ecológicas similares a reservas de la biosfera, parques nacionales, monumentos naturales, áreas de protección de los recursos naturales, áreas de protección de flora y fauna, santuarios, parques y reservas estatales, o bien, similares a las zonas de conservación ecológica municipal.

Las ADVC se pueden establecer en terrenos en posesión de pueblos indígenas, organizaciones sociales, personas morales públicas o privadas, y personas físicas, además de personas interesadas en destinar voluntariamente a la conservación predios de su propiedad o tenencia. Estas áreas son consideradas ANP de competencia federal, una vez que cuenten con un certificado emitido por la Semarnat a través de la Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas.

## Conclusiones

---

México tiene grandes ambiciones para la industria de energía renovable, con planes de duplicar su producción para 2030. A nivel mundial se identifica un incremento en la capacidad instalada de energía geotermoelectrica, incluso en el uso directo de esta energía. Una de sus grandes ventajas es su independencia a las condiciones meteorológicas y su limitado impacto ambiental en comparación con la mayoría de las demás

fuentes de energía. Sin embargo, es importante contemplar el equilibrio entre las variables ambientales, sociales y económicas, en todas las etapas de desarrollo de este tipo de energía, especialmente porque depende de la fuente de calor y de la recarga de agua profunda.

Asimismo, el tema de la calidad ambiental es complejo principalmente cuando las fuentes de agua, como los ríos, lagos y acuíferos, presentan condiciones preocupantes porque son sobreexplotados, están contaminados y son apropiados por intereses particulares de poblaciones tradicionales en los territorios de interés económico. A partir de la reclasificación del mapa geomorfológico por el método booleano, se pone en evidencia las áreas de mayor pendiente. Esta regularidad probablemente se deba a que las pendientes más pronunciadas se vinculen con escarpes y estos a fallas donde la erosión ha alcanzado relieves más altos.

La evaluación multicriterio constituye una alternativa metodológica de gran utilidad para la identificación de territorios que presentan rasgos comunes para un objetivo concreto. En este estudio se ha pretendido mostrar las cuestiones metodológicas necesarias para aplicar este planteamiento a otros ámbitos temáticos y espaciales si bien, como ya se ha señalado con anterioridad, se trata de un método parametrizable, que puede ser modificado y adaptado para otros fines, siempre que los criterios considerados tengan un comportamiento continuo en el territorio analizado. La metodología propuesta permitió la incorporación en el modelo de una gran cantidad de información, a pesar de su sencillez y facilidad de aplicación, utilizando las funciones básicas proporcionadas por todos los paquetes SIG, además de la obtención de los mapas de potenciales para cada una de las actividades prioritarias seleccionadas que se emplean como base en la determinación del uso ambientalmente recomendado para cada una de las unidades dentro de la definición del modelo de ordenamiento ambiental del territorio.

El agua que circula por los cauces se alimenta de las escorrentías de los tributarios. Si bien se arrastra el material particulado, evidentemente no es eliminado pues gran parte de él llega al cauce principal dentro de

las cuencas, arrastrando con él partículas minerales y orgánicas del suelo, hasta alcanzar una zona de sedimentación. Las variables analizadas en las zonas de estudio revelan una relación directamente proporcional entre el incremento en los niveles de agua, relacionados con el aumento de las pendientes, y la tasa de sedimentación. Por el contrario, la presencia de variables de polución presenta una considerable disminución en los periodos de secas a diferencia de los de lluvias en valores registrados de los monitoreos efectuados durante estas temporadas.

No se puede olvidar que no siempre los aportes contaminantes son de origen antrópico. La hidráulica de los cursos de agua tiene una energía que arrastra de manera natural sedimentos y lixivia iones metálicos; un claro ejemplo de esto es la presencia de arsénico, aluminio, molibdeno, etc. dentro de la zona de exploración de Acoculco. Para el caso de la zona de explotación de Los Humeros también se tuvo presencia de arsénico, aluminio y molibdeno (García-Zarate et al., 2023), que de manera natural van a terminar cuenca abajo, sin intervención humana. El empleo de las herramientas del SIG y de las técnicas de evaluación multicriterio permitió utilizar las mismas como una herramienta alternativa de apoyo a la planificación territorial, particularmente en su posibilidad de realizar diagnósticos y propuestas de intervención.

### **Zona de exploración Acoculco, Puebla**

El escenario actual y el escenario pesimista con base en el ISA son muy parecidos para la zona norte del sitio y considerando que para el escenario pesimista la zona norte no se ve ampliamente afectada por esto, es de especial atención que se promueva el desarrollo de las actividades dentro de la zona a partir de lineamientos muy apegados a la conservación de los recursos naturales y al desarrollo sostenible, que fomenten el cumplimiento de la agenda ambiental formulada a través de los Objetivos de Desarrollo Sostenible para el estado y municipios de Puebla, particularmente las actividades que causan impacto y la conservación de la zona

boscosa (relacionadas con el IIA y el IF), que fueron las variables con los valores más significativos para el ISA.

Idealmente se debe buscar la participación de los habitantes de la zona para realizar actividades que involucren el fomento y protección al área de bosque, que es la que mantiene la mejor condición ante los tres escenarios planteados. El escenario optimista sí presenta condiciones de mejora en el sistema ambiental, sin embargo, es importante que si el proyecto se ejecuta, pueda impulsar acciones de conservación hacia la zona de bosque y con vegetación secundaria como áreas de recuperación.

### **Zona geotermoeléctrica, Los Humeros, Puebla**

El desarrollo del proyecto sin planeación y control, sin considerar las actividades de la zona y las costumbres de los pobladores, puede llevar al cambio de variables del sistema ambiental y a condiciones como las que plantea el escenario pesimista, que indica cambios drásticos entre el escenario actual y el optimista. Inclusive considerando que los escenarios actual y pesimista presentan condiciones parecidas, es importante que cuanto antes se desarrollen lineamientos de manejo y conservación que permitan que las actividades se realicen con base en la sustentabilidad. Se debe tener especial atención a proponer acciones que mejoren las condiciones que se describen con el IIA, el IF y el IIE, que son los que más afectan el valor final del ISA. Los resultados obtenidos constituyen una valiosa información en manos de los tomadores de decisión que ayudan a la gestión integral de los recursos del municipio a fin de mitigar los efectos antropogénicos dentro de la zona de estudio.

Otro aspecto importante es determinar el rol del Estado y de los municipios, por lo que se sugiere llevar el monitoreo y vigilancia de la contaminación para la evaluación de la escorrentía urbana, la contaminación difusa, la contaminación por lixiviación, los derrames de petróleo a nivel de cuencas y los problemas sanitarios que recaen en diversos organismos. En varios países la contaminación es abordada por las instituciones ambientales.

## Recomendaciones

---

Es necesario promover el uso de las evaluaciones de las estrategias ambientales, ya que hay deficiencias en la planificación y compatibilización de decisiones a nivel de políticas, planes y programas que permitan mejorar los análisis para manifestar las necesidades y lograr generar procedimientos para identificar los impactos relevantes a fin de caracterizarlos y medirlos como instrumentos de apoyo en la toma de decisiones a nivel de autoridades de gobierno, proponentes, consultores, comunidad, academia y, en general, actores involucrados en las estrategias ambientales.

Es conveniente incorporar análisis integrados que consideren la sinergia entre impactos generados por los proyectos dentro de las áreas de estudio de Acozulco, como lo es para el caso del área de explotación de Los Humeros, por lo que se debe promover la incorporación de tecnologías de estimación de impactos ambientales que pueden llegar a afectar la calidad de los ecosistemas y, si es factible, la identificación, caracterización y estimación de impactos que podrían representar un riesgo para las comunidades existentes en las zonas estudiadas, como pudiera ser el caso del agua potable que es utilizada como una fuente de abastecimiento para las poblaciones cercanas, con el objeto de definir las medidas preventivas y correctivas necesarias para proteger el medioambiente.

Es necesario asignar una mayor relevancia a los planes de manejo para incentivar una elaboración más adecuada de los estudios y promover conocimiento, como las mejores prácticas para perfeccionar los procesos de mitigación y compensación, especialmente de impactos acumulativos y sinérgicos, elaborando guías de participación ciudadana que promuevan metodologías de inclusión de las comunidades, y establecer los mecanismos que garanticen la disponibilidad de información a los grupos sociales involucrados directamente e indirectamente en los proyectos.

## **AGRADECIMIENTOS**

*Los autores agradecen a la Comisión Federal de Electricidad (CFE) por su asistencia y apoyo. Este trabajo presenta resultados parciales de dos proyectos financiados por el fondo Sener-Conacyt, que fueron el P25 del CeMIE-Geo (2014-207032) y el WP9 en el proyecto GEMex (2015-04-268074), este último también cofinanciado con el programa de investigación e innovación Horizonte 2020 de la Unión Europea bajo el acuerdo de subvención No. 727550.*

## REFERENCIAS

- Adebowale, K. O., Agunbiade, F. O., y Olu-Owolabi, B. I. (2009). Trace metal concentrations, site variations and partitioning pattern in water and bottom sediments from coastal area: a case study of Ondo coast, Nigeria. *Environmental Research Journal*, 3(2), 46-59.
- Apergis, N., y Tsoumas, C. (2011). Integration properties of disaggregated solar, geothermal and biomass energy consumption in the U.S. *Energy Policy*, 39(9), 5474-5479. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2011.05.015>
- Ariki, K., Kato, H., Ueda, A., y Bamba, M. (2000). Characteristics and management of the Sumikawa geothermal reservoir, northeastern Japan. *Geothermics*, 29(2), 171-189. [https://doi.org/10.1016/S0375-6505\(99\)00056-5](https://doi.org/10.1016/S0375-6505(99)00056-5)
- Arnoldus, H. M. J. (1977). Methodology used to determine the maximum potential average annual soil loss due to sheet and rill erosion in Morocco. *FAO Soils Bulletin*, 34, 39-48.
- Auerswald, K., Fiener, P., Martin, W., y Elhaus, D. (2014). Use and misuse of the K factor equation in soil erosion modeling: An alternative equation for determining USLE nomograph soil erodibility values. *Catena*, 118, 220-225.
- Bannari, A., El-Battay, A., Hameid, N., y Tashtoush, F. (2017). Salt-affected soil mapping in an arid environment using semi-empirical model and Landsat-OLI Data. *Advances in Remote Sensing*, 6(4), 260-291. <https://doi.org/10.4236/ars.2017.64019>
- Barasa Kabeyi, M. J. (2019). Geothermal electricity generation, challenges, opportunities and recommendations. *International Journal of Advances in Scientific Research and Engineering*, 5(8), 53-95. <https://doi.org/10.31695/ijas-re.2019.33408>

- Barbier, E. (1997). Nature and technology of geothermal energy: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 1(1-2), 1-69. [https://doi.org/10.1016/S1364-0321\(97\)00001-4](https://doi.org/10.1016/S1364-0321(97)00001-4)
- Barbieri, M. (2016). The importance of Enrichment Factor (EF) and Geoaccumulation Index (Igeo) to evaluate the soil contamination. *Journal of Geology & Geophysics*, 5(1), 1-4. <https://doi.org/10.4172/2381-8719.1000237>
- Besteiro, S., y Delgado, M. (2011). Evaluación de la agresividad de las precipitaciones en la cuenca del Arroyo El Pescado, provincia de Buenos Aires (Argentina). *Revista de la Facultad de Agronomía, La Plata*, 110(2), 82-90.
- Bonham-Carter, G. F. (1994). *Geographic Information Systems for Geoscientists* (1st ed.). Elsevier Science and Technology.
- Bonham-Carter, G. F. (1997). GIS methods for integrating exploration data sets. *Exploration 97: Fourth Decennial International Conference on Mineral Exploration*, 59-64.
- Brancalion, P. H. S., Garcia, L. C., Loyola, R., Rodrigues, R. R., Pillar, V. D., y Lewinsohn, T. M. (2016). A critical analysis of the Native Vegetation Protection Law of Brazil (2012): Updates and ongoing initiatives. *Natureza e Conservacao*, 14, 1-15. <https://doi.org/10.1016/j.ncon.2016.03.003>
- Canadian Council of Ministers of the Environment. (2003). *Canadian environmental quality guidelines*. CCME. <https://ccme.ca/en/current-activities/canadian-environmental-quality-guidelines>
- Cao, W., Durucan, S., Shi, J. Q., Cai, W., Korre, A., y Ratouis, T. (2022). Induced seismicity associated with geothermal fluids re-injection: Poroelastic stressing, thermoelastic stressing, or transient cooling-induced permeability enhancement? *Geothermics*, 102, 102404. <https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2022.102404>
- Carranza, E. J. M. (2009). Objective selection of suitable unit cell size in data-driven modeling of mineral prospectivity. *Computers and Geosciences*, 35(10), 2032-2046. <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2009.02.008>

- Cassard, D., Billa, M., Lambert, A., Picot, J. C., Husson, Y., Lasserre, J. L., y Delor, C. (2008). Gold predictivity mapping in French Guiana using an expert-guided data-driven approach based on a regional-scale GIS. *Ore Geology Reviews*, 34(3), 471-500. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2008.06.001>
- Chen, K., Chen, H., Zhou, C., Huang, Y., Qi, X., Shen, R., Liu, F., Zuo, M., Zou, X., Wang, J., Zhang, Y., Chen, D., Chen, X., Deng, Y., y Ren, H. (2020). Comparative analysis of surface water quality prediction performance and identification of key water parameters using different machine learning models based on big data. *Water Research*, 171, 115454. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2019.115454>
- Comisión Nacional del Agua. (2020). *Actualización de la disponibilidad media anual de agua en el acuífero Libres-Oriental*. Conagua.
- Comisión Nacional del Agua. (2021). *Información estadística climatológica*. Conagua. <https://smn.conagua.gob.mx/es/climatologia/informacion-climatologica/informacion-estadistica-climatologica>
- Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad. (2020). *Geoport al de Conabio: Sistema Nacional de Información sobre Biodiversidad*. <http://geoport al.conabio.gob.mx/>
- Dano, U., Balogun, A.-L., Matori, A.-N., Wan Yusouf, K., Abubakar, I., Said Mohamed, M., Aina, Y., y Pradhan, B. (2019). Flood susceptibility mapping using GIS-based analytic network process: A case study of Perlis, Malaysia. *Water*, 11(3), 615. <https://doi.org/10.3390/w11030615>
- De Bolós, M., y Gómez Ortiz, A. (2004). L'Alt Pirineu i Aran. Cartografia d'unitats funcionals de paisatge. *Annals del Centre d'Estudis Comarcals del Ripollès*, 17, 65-75.
- Delgado, J. (2020). Estimation of soil loss using the USLE model and GIS tools in the Chillón river basin, Lima, Perú. *South Sustainability*, 1(1), e007.
- DeMers, M. N. (2001). *GIS Modeling in Raster*. Wiley.
- Diario Oficial de la Federación. (2008). *Ley para el Aprovechamiento Sustentable de la Energía*. [https://dof.gob.mx/nota\\_detalle.php?codigo=5070928&fecha=28/11/2008#gsc.tab=0](https://dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5070928&fecha=28/11/2008#gsc.tab=0)

- Dickson, M. H., y Fanelli, M. (2003). Geothermal background. En M. H. Dickson y M. Fanelli (Eds.), *Geothermal energy: Utilization and technology* (pp. 1-27). United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization.
- Eastman, J. R. (2001). *Guide to GIS and image processing*. Idrisi 32 Release 2.
- Ekengele, L. N., Blaise, A., y Jung, M. C. (2017). Accumulation of heavy metals in surface sediments of Lere Lake, Chad. *Geosciences Journal*, 21(2), 305-315. <https://doi.org/10.1007/s12303-016-0047-4>
- Ferreira, J., Aragão, L. E. O. C., Barlow, J., Barreto, P., Berenguer, E., Bustamante, M., Gardner, T. A., Lees, A. C., Lima, A., Louzada, J., Pardini, R., Parry, L., Peres, C. A., Pompeu, P. S., Tabarelli, M., y Zuanon, J. (2014). Brazil's environmental leadership at risk: Mining and dams threaten protected areas. *Science*, 346(6210), 706-707. <https://doi.org/10.1126/science.1260194>
- Fick, S. E., y Hijmans, R. J. (2017). WorldClim 2: new 1-km spatial resolution climate surfaces for global land areas. *International Journal of Climatology*, 37(12), 4302-4315. <https://doi.org/10.1002/joc.5086>
- Fridleifsson, I. B. (2001). Geothermal energy for the benefit of the people. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 5(3), 299-312. [https://doi.org/10.1016/S1364-0321\(01\)00002-8](https://doi.org/10.1016/S1364-0321(01)00002-8)
- Fridleifsson, I. B. (2003). Status of geothermal energy amongst the world's energy sources. *Geothermics*, 32(4), 379-388. <https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2003.07.004>
- Gale, S., y Atkinson, M. (1979). On the set theoretic foundations of the regionalization problem. En S. Gale y G. Olsson (Eds.), *Philosophy in Geography. Theory and Decision Library* (pp. 65-107). Springer Netherlands. [https://doi.org/10.1007/978-94-009-9394-5\\_5](https://doi.org/10.1007/978-94-009-9394-5_5)
- García-Zárate, M. A., González-Acevedo, Z. I., y Orozco-Durán, A. (2023). Potentially toxic elements in waters from Los Humeros geothermal power plant: Natural or anthropogenic? *Groundwater for Sustainable Development*, 20, 100869. <https://doi.org/10.1016/j.gsd.2022.100869>
- Gómez-Orea, D. (1978). *El medio físico y la planificación I y II*. CIFCA.

- González-Acevedo, Z. I., y Parés-Olguín, F. (2016). Propuesta metodológica para determinar el desarrollo sustentable de zonas con potencial geotérmico. *Geotermia*, 29(2).
- González-Partida, E., Tello-Hinojosa, E., y Pal-Verma, M. (2001). Interacción agua geotérmica-manantiales en el campo geotérmico de Los Humeros, Puebla, México. *Ingeniería Hidráulica en México*, 16(2), 185-194.
- Gunnlaugsson, E. (2012). *The Hellshedi Geothermal Project - Financial aspects of geothermal development*. United Nations University, LaGeo.
- Gutiérrez-Negrín, L. C. A., Canchola-Félix, I., Romo-Jones, J. M., y Quijano-León, J. L. (2021). Geothermal energy in Mexico: update and perspectives. *World Geothermal Congress 2020+1*, 1-13.
- Hansen, L., Hoffman, J., Drews, C., y Mielbrecht, E. (2010). Designing climate-smart conservation: Guidance and case studies. *Conservation Biology*, 24(1), 63-69. <https://doi.org/10.1111/j.1523-1739.2009.01404.x>
- Heikkila, E. J., Shen, T. Y., y Yang, K. Z. (2003). Fuzzy urban sets: Theory and application to desakota regions in China. *Environment and Planning B: Planning and Design*, 30(2), 239-254. <https://doi.org/10.1068/b12820>
- Hoteit, H., He, X., Yan, B., y Vahrenkam, V. (2021). Optimization and uncertainty quantification model for time-continuous geothermal energy extraction undergoing re-injection. *arXiv*, (Dec 2021), 1-44. <http://arxiv.org/abs/2112.05544>
- Huang, Y. C., y Chen, W. (2022). Comment on “Changing climate and land use of 21st century influences soil erosion in India” by Pal et al., Gondwana Research, Volume 94, Pages 164-185. *Gondwana Research*, 107, 63. <https://doi.org/10.1016/j.gr.2022.01.022>
- Igwe, O., Adepehin, E. J., Iwuanyanwu, C., y Una, C. O. (2014). Risks associated with the mining of Pb-Zn minerals in some parts of the Southern Benue trough, Nigeria. *Environmental Monitoring and Assessment*, 186(6), 3755-3765. <https://doi.org/10.1007/s10661-014-3655-3>
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía. (2000). *Diccionario de datos climáticos, escalas 1:250 000 y 1:1 000 000*. INEGI. <https://www.inegi.org.mx/conte->

nidos/productos/prod\_serv/contenidos/espanol/bvinegi/productos/historicos/2104/702825223885/702825223885\_1.pdf

Instituto Nacional de Estadística y Geografía. (2011). *Unidades climáticas de los Estados Unidos Mexicanos. Escala 1:1 000 000. Proyección cónica conforme de Lambert*. INEGI.

Instituto Nacional de Estadística y Geografía. (2014). *Cartas de uso de suelo y vegetación (E1402-E1403-F1411-F1412) Escala 1:250 000. Serie IV*. INEGI.

Instituto Nacional de Estadística y Geografía. (2021). *Temas*. <https://inegi.org.mx/temas>

Jenerette, G. D., y Wu, J. (2001). Analysis and simulation of land-use change in the central Arizona - Phoenix region, USA. *Landscape Ecology*, 16(7), 611-626. <https://doi.org/10.1023/A:1013170528551>

Jiang, H., y Eastman, J. R. (2000). Application of fuzzy measures in multi-criteria evaluation in GIS. *International Journal of Geographical Information Science*, 14(2), 173-184. <https://doi.org/10.1080/136588100240903>

Jolie, E., Gutiérrez-Negrín, L. C., Kieling, K., Liotta, D., Arango-Galván, C., Páll-Hersir, G., Benediktsdóttir, A., Deb, P., Aragón, A., Thorbjornsson, I. O., Michele, C., Schill, E., Andrea, T., Zambrano, T., Gaucher, E., Kruszewski, M., Lelli, M., Muller, J., López-Hernández, A., Bruhn, D., Calcagno, P., Garduño-Monroy, H., y Van Wees, J. D. (2021). The GEMex project: Developing Los Humeros (Mexico) as a superhot geothermal site. *World Geothermal Congress 2020+1*, 14.

Kamarudin, M. K. A., Nalado, A. M., Toriman, M. E., Juahir, H., Umar, R., Ismail, A., Abd Wahab, N., Md Saad, M. H., Maulud, K. N., Hanafiah, M. M., Mohd Saudi, A. S., y Harith, H. (2019). Evolution of river geomorphology to water quality impact using remotesensing and GIS technique. *Desalination and Water Treatment*, 149, 258-273. <https://doi.org/10.5004/dwt.2019.23838>

Khong, W. L., y Wahab, S. N. (2019). Multiple linear regression modelling of parcels distribution design factors and online shopping customer satisfaction. *International Journal of Modelling in Operations Management*, 7(2), 1. <https://doi.org/10.1504/ijmom.2019.10020895>

- Lawson, D. R., y Winchester, J. W. (1979). A standard crustal aerosol as a reference for elemental enrichment factors. *Atmospheric Environment (1967)*, 13(7), 925-930. [https://doi.org/10.1016/0004-6981\(79\)90003-9](https://doi.org/10.1016/0004-6981(79)90003-9)
- Lozada, J. (2019). Investigación aplicada: definición, propiedad intelectual e industria. *Cienciamérica*, 1(3), 34-39. <http://www.uti.edu.ec/documents/investigacion/volumen3/06Lozada-2014.pdf>
- Majhi, A., Shaw, R., Mallick, K., y Patel, P. P. (2021). Towards improved USLE-based soil erosion modelling in India: A review of prevalent pitfalls and implementation of exemplar methods. *Earth-Science Reviews*, 221, 103786. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2021.103786>
- Manchado Garabito, R., Tamames Gómez, S., López González, M., Mohedano Macías, L., D'Agostino, M., y Veiga de Cabo, J. (2009). Revisión sistemática exploratoria. *Medicina y Seguridad del Trabajo*, 55(216), 12-19. <https://doi.org/10.4321/s0465-546x2009000300002>
- Mason, I. G., Page, S. C., y Williamson, A. G. (2010). A 100% renewable electricity generation system for New Zealand utilising hydro, wind, geothermal and biomass resources. *Energy Policy*, 38(8), 3973-3984. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2010.03.022>
- Metzger, J. P. (2008). Landscape ecology: Perspectives based on the 2007 IALE world congress. *Landscape Ecology*, 23(5), 501-504. <https://doi.org/10.1007/s10980-008-9217-8>
- Müller, G. (1979). Schwermetalle in den sedimenten des Rheins-Veränderungen seit. *Umschau*, 79, 133-149.
- Nassauer, J. I. (1995). Messy ecosystems, orderly frames. *Landscape Journal*, 14(2), 161-170. <https://doi.org/10.3368/lj.14.2.161>
- Osman, A. I., Chen, L., Yang, M., Msigwa, G., Farghali, M., Fawzy, S., Rooney, D. W., y Yap, P. S. (2022). Cost, environmental impact, and resilience of renewable energy under a changing climate: A review. *Environmental Chemistry Letters*, 21(2), 741-764. <https://doi.org/10.1007/s10311-022-01532-8>

- Özcan, Z., y Ekici, Ö. (2021). A novel working fluid selection and waste heat recovery by an exergoeconomic approach for a geothermally sourced ORC system. *Geothermics*, 95, 102151. <https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2021.102151>
- Pastrana-Melchor, E. J., Fernández-Solorzano, M. E., Mendoza-Rangel, E., y Hernández-Ayala, C. (2005). Contexto ambiental del desarrollo del campo geotérmico de Los Humeros, Puebla. *Geotermia*, 18(1), 3-17.
- Pérez Mora, W. H. (2021). Evaluación del índice de geoacumulación de algunos metales pesados en suelos de cultivo de hortalizas en la ribera del río Bogotá. *Revista ION*, 34(1). <https://doi.org/10.18273/revion.v34n1-2021004>
- Peters, G. P., Andrew, R. M., Boden, T., Canadell, J. G., Ciais, P., Le Quéré, C., Marland, G., Raupach, M. R., y Wilson, C. (2013). The challenge to keep global warming below 2 °C. *Nature Climate Change*, 3(1), 4-6. <https://doi.org/10.1038/nclimate1783>
- Prontuario de Información Geográfica Municipal de los Estados Unidos Mexicanos. (2009). *Puebla, Clave geoestadística 21053 y 21208*. PIGMEUM.
- Piper, A. M. (1945). A graphic procedure in geochemical interpretation of water analysis. *American Geophysics*, 25(6), 914-928. <https://doi.org/10.1029/TR025i006p00914>
- Purkus, A., y Barth, V. (2011). Geothermal power production in future electricity markets-A scenario analysis for Germany. *Energy Policy*, 39(1), 349-357. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2010.10.003>
- Rezaei, A., Hassani, H., Hassani, S., Jabbari, N., Fard Mousavi, S. B., y Rezaei, S. (2019). Evaluation of groundwater quality and heavy metal pollution indices in Bazman basin, southeastern Iran. *Groundwater for Sustainable Development*, 9, 100245. <https://doi.org/10.1016/j.gsd.2019.100245>
- Rocha-López, S., Jiménez-Salgado, E., y Palma-Guzmán, H. (2006). *Propuesta para dos pozos exploratorios en el proyecto geotérmico de Acoculco, Pue.* Comisión Federal de Electricidad.
- Rybach, L. (2003). Geothermal energy: Sustainability and the environment. *Geothermics*, 32(4-6), 463-470. [https://doi.org/10.1016/S0375-6505\(03\)00057-9](https://doi.org/10.1016/S0375-6505(03)00057-9)

- Salgado, A. (2007). Evaluación del rigor metodológico y retos. *Liberabit*, 13(13), 71-78.
- Salgado, E. J., Medina, F. S., y Covarrubias, A. M. (2014). Estudio geohidrológico en el campo geotérmico de Los Humeros, Pue. *Geotermia*, 27(1), 25-41.
- Secretaría de Energía. (2021). *Balance Nacional de Energía 2021*. Subsecretaría de Planeación y Transición Energética, Sener. <https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/805509/BNE-2021.pdf>
- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. (2019). *Informe de la situación del medio ambiente en México 2018. Compendio de estadísticas ambientales, indicadores clave, de desempeño ambiental y crecimiento verde*. Semarnat. [https://apps1.semarnat.gob.mx:8443-/dgeia/informe18/tema/pdf/Informe2018GMX\\_web.pdf](https://apps1.semarnat.gob.mx:8443-/dgeia/informe18/tema/pdf/Informe2018GMX_web.pdf)
- Sistema de Manejo de Recursos Forestales. (2007). *Diagnóstico socioeconómico y de manejo forestal de la unidad de manejo forestal Zacatlán*. SMRN, Asociación regional de Silvicultores Chignahuapan-Zacatlán, A. C. Puebla, México.
- Soltani, M., Moradi Kashkooli, F., Souri, M., Rafiei, B., Jabarifar, M., Gharali, K., y Nathwani, J. S. (2021). Environmental, economic, and social impacts of geothermal energy systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 140, 110750. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.110750>
- Sugai, L. S. M., Ochoa-Quintero, J. M., Costa-Pereira, R., y Roque, F. O. (2015). Beyond aboveground. *Biodiversity and Conservation*, 24(8), 2109-2112. <https://doi.org/10.1007/s10531-015-0918-4>
- Tello-Hinojosa, E. (1994). *Química de los fluidos hidrotermales de la zona geotérmica de la caldera de Acoculco, Pue*. Comisión Federal de Electricidad.
- Tiwari, A. K., De Maio, M., Singh, P. K., y Mahato, M. K. (2015). Evaluation of surface water quality by using GIS and a Heavy Metal Pollution Index (HPI) model in a coal mining area, India. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, 95(3), 304-310. <https://doi.org/10.1007/s00128-015-1558-9>
- Tomaszewska, B., Pająk, L., Bundschuh, J., y Bujakowski, W. (2018). Low-enthalpy geothermal energy as a source of energy and integrated freshwater produc-

- tion in inland areas: Technological and economic feasibility. *Desalination*, 435, 35-44. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2017.12.032>
- Turekian, K., y Wedepohl, K. (1961). Distribution of the elements in some major units of the earth's crust. *Boletín GSA*, 72(2), 175-192.
- United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization. (2007). *Water portal newsletter 161: Water related diseases*. UNESCO. <http://www.unesco.org/water/news/newsletter/161.shtml>
- U. S. Environmental Protection Agency. (1989). *Risk assessment guidance for superfund, volume 1: human health evaluation manual (part A)*. USEPA, Office of Emergency and Remedial Response.
- U. S. Environmental Protection Agency. (2018). *Edition of the drinking water standards and health advisories*. USEPA. <https://www.epa.gov/system/files/documents/2022-01/dwtable2018.pdf>
- Viggiano-Guerra, J. C., Flores-Armenta, M., y Ramírez-Silva, G. (2011). Evolución del sistema geotérmico de Acoculco, Pue., México: un estudio con base en estudios petrográficos del pozo EAC-2 y en otras consideraciones. *Geotermia*, 24(1), 14-24.
- Wang, H., y Qiu, F. (2017). Investigating the impact of agricultural land losses on deforestation: evidence from a peri-urban area in Canada. *Ecological Economics*, 139, 9-18. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2017.04.002>
- Winter, T. C. (2001). The concept of hydrologic landscapes. *Journal of the American Water Resources Association*, 37(2), 335-349. <https://doi.org/10.1111/j.1752-1688.2001.tb00973.x>
- Wischmeier, W. H., y Dwight, D. S. (1978). *Predicting rainfall erosion losses: A guide to conservation planning*. Science and Education Administration, United States Department of Agriculture.
- World Health Organization. (2011). *Guidelines for drinking-water quality*. WHO.
- Youssef, A. M., Abdel-Moneim, A. A., y Abu-El-Maged, S. A. (2016). Flood hazard assessment and its associated problems using geographic information systems,

Sohag Governorate, Egypt. *The Fourth International Conference on the Geology of Africa*, 1, 1-17. <https://www.researchgate.net/publication/259236978>

Zhang, G., Parker, A., House, A., Mai, B., Li, X., Kang, Y., y Wang, Z. (2002). Sedimentary records of DDT and HCH in the Pearl River Delta, South China. *Environmental Science and Technology*, 36(17), 3671-3677. <https://doi.org/10.1021/es0102888>

# CAPÍTULO 3.

## NANOFLUIDOS PARA EL MEJOR APROVECHAMIENTO TÉRMICO DE LA ENERGÍA SOLAR

**Yuridiana Rocío Galindo Luna,<sup>1\*</sup> Federico González,<sup>1</sup> Víctor Rentería,<sup>2</sup> Enrique Barrera Calva<sup>1</sup>**

<sup>1</sup> Universidad Autónoma Metropolitana-Iztapalapa. San Rafael Atlixco 186, Col. Vicentina, Iztapalapa, Ciudad de México, 09340. \*ygalindol@izt.uam.mx, fgg@xanum.uam.mx, ebc@xanum.uam.mx

<sup>2</sup> Centro Universitario de los Valles, Universidad de Guadalajara. Carretera Guadalajara-Ameca Km 45.5, Guadalajara, Jalisco, 46600. victor.renteria@academicos.udg

### Resumen

**E**n 2015 las Naciones Unidas adoptaron los 17 Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), diseñados para acabar con la pobreza, el hambre, el sida y la discriminación contra mujeres y niñas. Al aumentar la eficiencia térmica de los colectores solares, a través del uso de nanofluidos como fluidos de trabajo, estos colaboran en el alcance de cuatro de los ODS. Los fluidos de trabajo en aplicaciones térmicas convencionales poseen una conductividad térmica más baja que los sólidos, por lo que mejorar sus propiedades termofísicas provocaría un aumento en la transferencia de calor. Un nanofluido está compuesto por un fluido base y la adición de nanopartículas ya sean de materiales dieléctricos o metálicos, mezcla que es utilizada como fluido de trabajo para colectores solares de

baja y mediana temperatura, con el objetivo de lograr el mejor aprovechamiento de la luz radiada por el sol y su transformación en energía térmica más eficiente. En este ensayo se muestran los esfuerzos de la comunidad científica para mejorar la conductividad térmica y el calor específico de los fluidos convencionales, así como su efecto en el aprovechamiento de la energía solar. Por otra parte, también se enlistan los resultados sobre el efecto de la eficiencia térmica de los nanofluidos evaluados experimentalmente en colectores de placa plana y concentradores solares.

Palabras clave: **Nanofluidos; energía solar; dieléctricos; fluido de trabajo.**

---

## Abstract

In 2015, the United Nations adopted the 17 Sustainable Development Goals (SDGs), designed to end poverty, hunger, AIDS and discrimination against women and girls. When increasing the thermal efficiency of solar collectors, through the use of nanofluids as working fluids, they collaborate in achieving 4 of the SDGs. Conventional working fluids in thermal applications have a lower thermal conductivity than solids, hence improving their thermophysical properties would cause an increase in heat transfer. A nanofluid is a mixed of a base fluid and the addition of nanoparticles, whether dielectric or metallic materials, this mixture is used as a working fluid for low and medium temperature solar collectors, with the aim of achieving the best use of radiated light by the sun and its transformation into more efficient thermal energy. This essay shows the efforts of the scientific community to improve the thermal conductivity and specific heat of conventional fluids, as well as their effect on the use of solar energy. On the other hand, the results on the effect of the thermal efficiency of the nanofluids experimentally evaluated in flat plate collectors and solar concentrators are also listed.

Keywords: **Nanofluids; solar energy; dielectrics; working fluid.**

## Introducción

Los Objetivos de Desarrollo Sostenible son parte del plan maestro para conseguir un futuro sostenible, por lo cual es necesario aprovechar todos los recursos que se tengan disponibles. Las fuentes de energía renovable representan una opción viable para la obtención de energía con un impacto menor al ambiente. La energía solar es la energía más abundante en el planeta y lograr su aprovechamiento es el reto al que se enfrenta la comunidad científica (Wang et al., 2023). Los colectores solares son los dispositivos diseñados para convertir la energía solar en energía térmica (Chen et al., 2020). Para lograr esta conversión se requiere que la irradiación solar en forma de luz se absorba y posteriormente sea transferida a un fluido de trabajo.

Durante años el agua y el aceite térmico han sido, por excelencia, los fluidos de trabajo utilizados en los colectores solares, sin embargo, estos fluidos poseen relativamente bajos coeficientes de conductividad (Nazifiard et al., 2012). La búsqueda de alternativas para incrementar el coeficiente de conductividad de fluidos de trabajo convencionales dio lugar a los llamados nanofluidos. Un nanofluido es un coloide en el que la fase dispersa son nanopartículas de materiales dieléctricos o metálicos, en tanto que la fase continúa sigue siendo un fluido de trabajo convencional. Así, un nanofluido combina las características de almacenar y transportar la energía a través de la fase continua con las propiedades térmicas de la fase dispersa.

En septiembre de 2015 los estados miembros de la Organización de las Naciones Unidas, entre los que se encuentra México, aprobaron la Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible. La Agenda 2030 de México pretende orientar mediante acciones multisectoriales a preservar el planeta, la prosperidad económica en disminución de las desigualdades, y fomentar la paz y las alianzas (Gobierno de México, 2023). La aplicación de los nanofluidos impacta directamente en cuatro de los 17 objetivos, los cuales son: energía asequible y no contaminante (7), trabajo decente y crecimiento económico (8), industria, innovación e infraestructura (9) y

ciudades y comunidades sostenibles (11) al aplicarse en diferentes colectores solares.

México posee un gran potencial para el uso de energía solar, como lo constatan los siguientes análisis. Tagle et al. (2016) evaluaron dos casos de estudio: una fábrica que produce alimento para pollos en Morelia necesitaba cubrir la demanda energética para producir 12 150 litros/día de vapor, para lo cual se utilizó un concentrador cilindro parabólico (CCP) de 3.3 m<sup>2</sup> de área. Los resultados mostraron que a valores promedio de 920 W/m<sup>2</sup> en un periodo de seis horas se logra calentar agua a 85 °C obteniendo 140 kW de potencia térmica y una eficiencia máxima del 58 por ciento. Asimismo, una fábrica en Sinaloa necesitaba 11 000 litros/día de agua caliente para su producción, para este caso se propuso una radiación solar media de 1 000 W/m<sup>2</sup> para un CCP durante seis horas de sol. Los autores concluyeron que usando 54 colectores pueden alcanzar una temperatura de 90 °C, con una potencia de 103 kW y una eficiencia térmica de 57 % (Tagle et al., 2016).

Acosta-Pazmiño et al. (2021) se enfocaron en la industria de los alimentos y bebidas en el Valle de México, Guadalajara, Monterrey y Torreón, regiones con mayor potencial para implementar tecnología solar híbrida. De acuerdo a sus resultados, utilizando energía solar se logra una reducción de emisiones de CO<sub>2</sub> de hasta 51.7 % para efectos negativos, 43.51 % de estancamiento y 34.06 % de crecimiento económico positivo para 2030.

En el sector alimenticio, de acuerdo con May et al. (2020), el procesamiento de lácteos representa la tercera actividad más importante de la industria en México, lo que equivale a una producción anual constante de 1.3 % desde hace 33 años. Los estados con mayor producción son Jalisco, Chihuahua, Coahuila y Durango, con 53 % de la producción total (Lara y Alvarado, 2021). Con el objetivo de lograr la implementación de un sistema de concentración solar capaz de cubrir la demanda energética en el proceso de pasteurización de la industria láctea, se analizó una planta que opera los siete días de la semana, ocho horas, considerando cuatro climas de México. Los mejores resultados fueron obtenidos para un clima cálidos.

do, con valores máximos promedio de 88.50 °C de temperatura de fluido, 81.85 kW de generación de calor útil y 24.84 % de eficiencia térmica (Cetina-Quiñones et al., 2022).

Como se ha demostrado, México ha desarrollado proyectos para cubrir su demanda energética a partir de energía solar y el uso de nanofluidos contribuirá a incrementar su desempeño. La Figura 1 muestra un diagrama a manera de resumen del trabajo de los autores comentados en esta sección.

El presente capítulo tiene como objetivo informar al lector acerca del impacto que tiene el uso de los nanofluidos para el aprovechamiento de la energía solar. La metodología considera la clasificación de los colectores solares en tecnologías fototérmicas, seguida de las propiedades termofísicas que convierten a los nanofluidos en candidatos para ser empleados como fluidos de trabajo dentro de los colectores solares. Y finalmente, demostrar en función de la revisión de análisis publicados cómo los nanofluidos poseen un impacto positivo en la eficiencia térmica de dispositivos de baja y mediana temperatura.

**FIGURA 1.** Resumen de los reportes de energía solar para procesos de alimentos en México



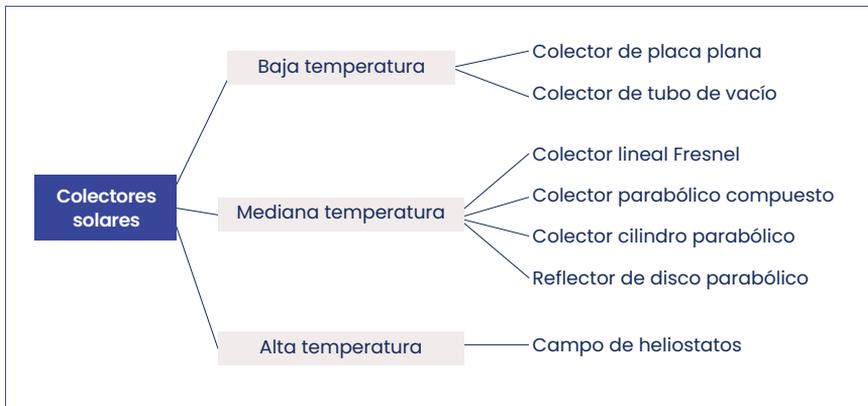
Fuente: Elaboración propia.

## Dispositivos solares y nanofluidos

### Tecnologías fototérmicas

La energía solar es la fuente renovable más abundante en nuestro planeta. Para lograr su aprovechamiento se diseñan y fabrican colectores solares que transforman la energía solar. En los últimos años se ha desarrollado la tecnología de combustibles solares (Zhang et al., 2021), sin embargo, de manera general, estos dispositivos se pueden clasificar en sistemas eléctricos solares, capaces de producir energía eléctrica a partir de la energía solar, y sistemas solares térmicos, los cuales transforman la energía solar en energía térmica a través de un colector solar. A fin de satisfacer la demanda total de energía en edificaciones modernas, la aplicación de estos sistemas solares para calentamiento de agua aumentó entre 40 % y 50 %. Esto ha permitido reducciones en las emisiones de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) y ahorros de energía (Pomianowski et al., 2020). Los colectores solares pueden clasificarse de acuerdo a su temperatura de operación, como se observa en la Figura 2.

**FIGURA 2.** Clasificación de los colectores solares



Fuente: Elaboración propia.

En los colectores solares el fluido de trabajo es el encargado del proceso de transferencia de calor desde la fuente hasta la aplicación final. Ahora se sabe que la adición de nanopartículas a los fluidos convencionales (agua y aceite térmico) mejora sus propiedades de transferencia de calor y hace posible un incremento en la eficiencia térmica de estos dispositivos.

## Propiedades termofísicas de los nanofluidos

### Conductividad térmica

La mejora en la conductividad térmica de los nanofluidos se explica, principalmente, a través de cuatro mecanismos: estratificación semi-sólida de moléculas líquidas, movimiento browniano, la peculiar agregación de las nanopartículas y la especificidad de la transferencia de calor (Liu et al., 2022). Además, se ha establecido una correlación significativa entre el tamaño, su forma y la fracción de volumen de las nanopartículas, la temperatura y el pH del fluido base y el incremento de la conductividad térmica de los nanofluidos (Aybar et al., 2015; Khan y Valan Arasu, 2019). Adicionalmente, debe señalarse que el mecanismo que da lugar a la mejora de la transferencia de calor en los nanofluidos no se entiende del todo a nivel microscópico. Este hecho dificulta el establecimiento de modelos de este proceso.

En la literatura especializada se encuentran reportes de la mejora en las propiedades térmicas. Por ejemplo, Xuan y Li (2000) utilizaron nanopartículas de cobre (Cu) en una fracción volumétrica de 5 % combinadas con agua con la finalidad de incrementar la transferencia de calor. Sus resultados muestran que la conductividad térmica aumenta de 1.24 a 1.78 cuando la fracción de volumen del nanofluido varía de 2.5 % v/v a 7.5 % v/v; lo anterior lo atribuyen a las partículas ultrafinas suspendidas en el nanofluido. Kole y Dey (2013) prepararon mediante ultrasonificación seguida de agitación magnética un nanofluido de cobre con agua destila-

da, libre de tensioactivos y estables. La concentración de la nanopartícula de Cu fue de 0.5 % w/w a una temperatura de 30 °C. Su análisis concluye que la conductividad térmica mejora en 15 % cuando se compara con una tubería que utiliza agua como fluido de trabajo. Garg et al. (2008) investigaron el efecto de la conductividad térmica en una mezcla de partículas de Cu (200 nm) con etilenglicol. Las fracciones volumétricas varían de 0.4 % v/v a 2.0 % v/v y la conductividad térmica incrementó al doble del valor predicho por el modelo de Maxwell. Zeng y Xuan (2018) utilizaron nanofluidos binarios compuestos por nanopartículas plasmónicas de SiO<sub>2</sub>-Ag y nanotubos de carbono de pared múltiple (MWCNT) para evaluar la conductividad térmica binaria. Se descubrió que al usar 0.1 % de fracción en volumen la conductividad mejora en 7 % con respecto a la mezcla base. Sinha et al. (2009) desarrollaron nanofluidos a partir de polvos de cobre y hierro y etilenglicol; el tamaño de la nanopartícula fue alrededor de 500 nm. Los mejores resultados muestran un incremento de 11 % a 33 % con el uso de Cu y de 25 % a 70 % utilizando hierro (Fe); las concentraciones utilizadas fueron de 0.2 % v/v a 2.0 % v/v.

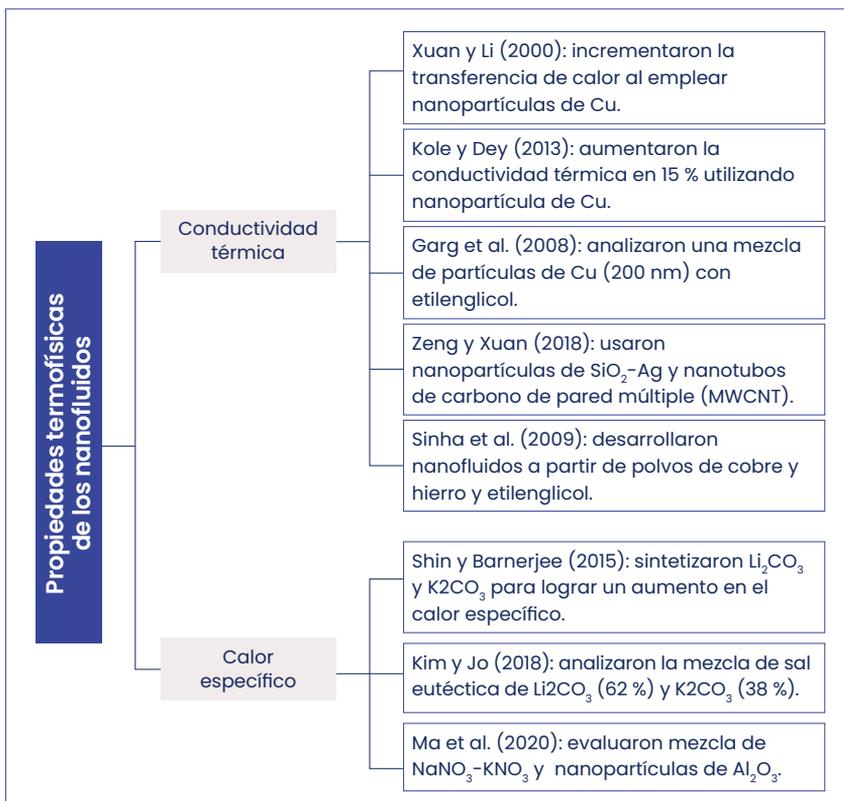
### **Calor específico**

Los nanofluidos poseen una mayor capacidad calorífica con respecto a los fluidos convencionales, característica que los hace aptos para la generación y almacenamiento de energía (Gholina et al., 2021). Shin y Barnerjee (2015) sintetizaron Li<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> y K<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> en una proporción molar de 62:38, con nanopartículas de óxido de silicio (SiO<sub>2</sub>) en una concentración de 1 % w/w. De acuerdo con su metodología, el calor específico se determinó utilizando un calorímetro diferencial de barrido. Sus resultados concluyen que al mezclar las nanopartículas con una concentración de 1 % w/w, el calor específico logró incrementos de entre 5 % y 15 % del Li<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>. Kim y Jo (2018) analizaron el incremento de la capacidad calorífica al agregar nanopartículas de plata (Ag) en una concentración del 1 % en peso a la mezcla de sal eutéctica de Li<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> (62 %) y K<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> (38 %). El calor específico de la mezcla de sal de carbonato puro fue de

1.646 kJ/kg K. Sus resultados muestran un incremento de 3.3 % cuando la mezcla eutéctica está combinada con nanopartículas de Ag; el valor determinado fue de 1.592 J/g K.

Ma et al. (2020) investigaron el efecto en la capacidad calorífica mezclando sal solar ( $\text{NaNO}_3\text{-KNO}_3$ ) con nanopartículas de  $\text{Al}_2\text{O}_3$  en tres concentraciones: 0.5 % w/w, 1.0 % w/w y 1.5 % w/w. El mayor incremento en su capacidad calorífica fue de 38.7 % cuando utilizaron la concentración del 1.0 % w/w de la alúmina. La Figura 3 presenta un diagrama que permite resumir las evaluaciones comentadas en esta sección.

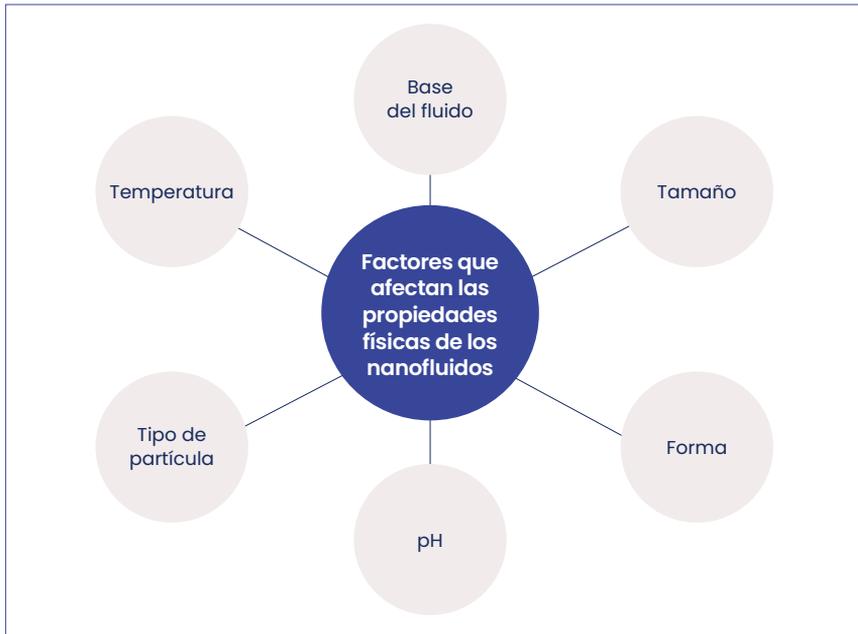
**FIGURA 3.** Resumen de las propiedades termofísicas de los nanofluidos



Fuente: Elaboración propia.

Las propiedades que afectan el comportamiento de los nanofluidos son mostradas en la Figura 4.

**FIGURA 4.** Factores que afectan las propiedades de los nanofluidos



Fuente: Elaboración propia.

### Nanofluidos y eficiencia

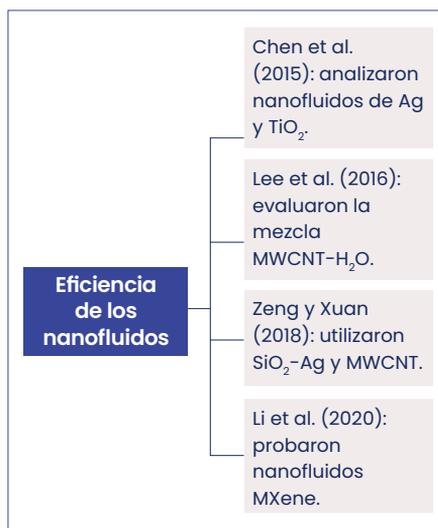
Un nanofluido es capaz de mejorar la eficiencia de los colectores solares. Chen et al. (2015) utilizaron un nanofluido de plata para mejorar la conversión térmica solar empleando luz solar simulada y natural. La evaluación experimental mostró que los nanofluidos de Ag logran resultados entre 85 % y 40 % de eficiencia de conversión fototérmica, con una concentración de Ag de 80.94 ppm, mientras que para óxido de zinc (ZnO) con una concentración de 1.02 % en peso se registran valores de entre 65 % y 30 %. Finalmente, para el nanofluido de TiO<sub>2</sub> al 0.7 % en

peso muestra eficiencias de 55 % al 30 %. La tasa de absorción específica alcanzó el valor más alto de 827 kW/kg, después de 5 minutos y una concentración de 20.24 ppm de Ag.

Lee et al. (2016) realizaron un estudio sobre la eficiencia térmica de receptores solares de superficie con fluidos base convencionales y lo compararon con respecto a receptores solares volumétricos utilizando nanofluidos de nanotubos de carbono de pared múltiple (MWCNT) a base de agua. Este trabajo concluye que la eficiencia de los receptores volumétricos es 10 % superior, con una concentración superior a 0.001 % en volumen. Los receptores que utilizan nanopartículas son capaces de transferir 90 % de la luz solar incidente. Zeng y Xuan (2018) prepararon nanofluidos binarios compuestos por nanopartículas plasmónicas de SiO<sub>2</sub>-Ag y MWCNT, con el objetivo de mejorar la conversión térmica solar. Los autores encontraron que los nanofluidos binarios (nanotubos y nanopartículas), los cuales poseen diferentes características de absorción espectral, pueden ajustarse de forma adecuada y lograr el aprovechamiento de la energía solar. El nanofluido binario con una concentración de 0.005 % en volumen logra una fracción de aprovechamiento solar promedio de 74.5 % con respecto a la que utiliza MWCNT, que alcanzó una fracción de 73.2 % v/v y 69.1 % v/v de SiO<sub>2</sub>-Ag.

Li et al. (2020) evaluaron nanofluidos MXene en un colector solar de absorción directa para determinar la eficiencia de la conversión fototérmica. Estos autores encontraron que la absorción de radiación solar

**FIGURA 5.** Resumen de las evaluaciones de eficiencia térmica



Fuente: Elaboración propia.

mejora a partir de fracciones de masa de 50 ppm de la nanopartícula. Durante la evaluación experimental la altura del colector fue de 10 mm con un flujo de radiación de 1 000 W/m<sup>2</sup>; la fracción de masa del nanofluido de 100 ppm logró un incremento en la eficiencia de absorción de 55.47 % mayor al del fluido base. La Figura 5 muestra una lista general de los análisis presentados en la sección.

## Aplicaciones de nanofluidos en tecnologías solares

A continuación se describe el efecto de los nanofluidos en las diferentes tecnologías solares, cuando son utilizados como fluido de trabajo.

### Colectores de baja temperatura

Moghadam et al. (2014) analizaron los efectos en la eficiencia térmica de las partículas de Cu-O en agua como medio absorbente en un colector de placa plana en Mashhad, Irán. El tamaño de la nanopartícula fue de 40 nm, la fracción volumétrica se mantuvo constante a 0.4 % y el flujo másico fue de 1 kg/min, 2 kg/min y 3 kg/min. Sus resultados muestran un aumento máximo en la eficiencia térmica de 21.8 % a un flujo másico de 1 kg/min, en comparación con agua.

Sharafeldin y Gróf (2018) realizaron pruebas experimentales en un colector de placa plana donde utilizaron una mezcla de CeO<sub>2</sub>-H<sub>2</sub>O como fluido de trabajo en Budapest. Las fracciones volumétricas usadas fueron 0.0167 % v/v, 0.0333 % v/v y 0.0666 % v/v, mientras que el tamaño promedio de las partículas fue de 25 nm. Para lograr la estabilidad del nanofluido utilizaron un proceso ultrasónico. Los autores reportaron un aumento máximo de 10.4 % con respecto al agua, cuando la fracción volumétrica fue de 0.0666 % a un flujo másico por área recorrida de 0.019 kg/s m<sup>2</sup>.

Sundar et al. (2020) desarrollaron un análisis experimental utilizando la mezcla Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-H<sub>2</sub>O combinada con una bobina de alambre con

insertos centrales para mejorar el desempeño de un colector de placa plana. Las concentraciones de nanopartículas fueron de 0.1 % v/v, 0.2 % v/v y 0.3 % v/v y tres configuraciones en los insertos. La eficiencia térmica máxima que utilizó agua fue de 53 % v/v, mientras que para el nanofluido fueron de 58 % v/v, 66 % v/v y 73 % v/v, respectivamente. Cuando se agrega la bobina la eficiencia logra un incremento de 64.15 % cuando se compara con agua.

Akram et al. (2021) utilizaron nanofluidos ZnO y SiO<sub>2</sub> en concentraciones en volumen de 0.05 % v/v, 0.1 % v/v, 0.15 % v/v y 0.2 % v/v. Sus resultados muestran un incremento en la eficiencia térmica mientras aumenta la carga de la nanopartícula en el fluido base. En comparación con agua el incremento en la eficiencia térmica máxima alcanzada fue de 8.0 %, 10.7 %, 12.96 % y 13.21 % al utilizar óxido de zinc y 9.30 %, 11.14 %, 13.75 % y 14.21 % con óxido de silicio, respectivamente.

### **Colectores de mediana temperatura**

Rehan et al. (2018) utilizaron un colector cilindro parabólico (CCP) de construcción artesanal para evaluar dos nanofluidos Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-H<sub>2</sub>O y Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-H<sub>2</sub>O bajo condiciones ambientales de Taxila, Pakistán. Las concentraciones de los óxidos metálicos fueron 0.20 %, 0.25 % y 0.30 % en peso, a flujos volumétricos de 1.0 L/min, 1.5 L/min y 2.0 L/min. Las eficiencias térmicas reportadas fueron 13 % para alúmina y 11 % con óxido férrico, valores superiores al compararse con agua bajo las condiciones más altas de concentración y flujo másico. Bellos y Tzivanidis (2019) analizaron teóricamente nanopartículas de Cu, CuO, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, TiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> y SiO<sub>2</sub> dispersas en aceite térmico (Syltherm 800) en un CCP con el objetivo de mejorar su rendimiento. El análisis contempla caudales de 50 L/min a 300 L/min, temperaturas de entrada de 300 K a 650 K y concentraciones de nanopartícula de 1 % v/v hasta 6 % v/v. De acuerdo con el modelo térmico utilizado, la nanopartícula más eficiente es Cu, seguida de CuO, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, TiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> y SiO<sub>2</sub>. Las eficiencias determinadas fueron 24.42 %, 19.49 %, 17.16 %, 14.20 %, 14.30 % y 7.28 %, respectivamente; los incrementos máximos

del desempeño térmico fueron calculados en 0.31 %, 0.54 % y 0.74 %, para concentraciones en volumen de 2.4 % y 6 % de Cu, a un caudal volumétrico de 150 L/min y temperatura de entrada de 600 K.

Heyhat et al. (2020) combinaron experimentalmente una mezcla de nanofluidos y una espuma metálica para mejorar el rendimiento de un colector solar cilindro parabólico de absorción directa. La concentración en volumen de CuO fue de 0.01 %, 0.05 % y 0.1 %. La máxima eficiencia térmica fue determinada en 79.29 %, combinando CuO-H<sub>2</sub>O al 0.1 % con un flujo de 100 Lph. Abed et al. (2021) analizaron una mezcla constituida por nanopartículas al 6 % fracción de volumen de SiO<sub>2</sub> y Thermi-nol VP-1. La temperatura de entrada fue mantenida constante en 400 K y la distribución de flujo de calor se consideró en dirección circunferencial. La eficiencia térmica logró incrementar 14.62 % bajo las condiciones mencionadas.

Mashhadian et al. (2021) prepararon un nanofluido mezclando nanopartículas de Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> y nanotubos de carbono de pared múltiple (MWCNT) dispersos en agua, para ser utilizado con fluido caloportador en un CCP. La concentración de volumen de alúmina fue de 0.01 %, 0.02 % y 0.04 %. Cuando la concentración es 0.04 % v/v para el nanofluido y para los nanotubos, la eficiencia térmica logra un aumento de 21 % en comparación con el uso de agua.

Los nanofluidos también han sido utilizados en Colectores Parabólico Compuestos (CPC) logrando mejoras significativas como las siguientes: Zafar et al. (2022) usaron nanopartículas de Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> y MgO para mezclarlas con agua y etilenglicol para mejorar el desempeño de un CPC. Los autores sintetizaron nanofluidos con tres concentraciones volumétricas 0.025 %, 0.05 % y 0.075 % y utilizaron dos flujos máxicos 0.02 kg/s y 0.015 kg/s. Los resultados experimentales muestran una máxima eficiencia térmica de 76.28 % utilizando la mezcla alúmina-agua a la máxima concentración y un caudal de 0.015 kg/s, mientras que para MgO-etilenglicol logra un aumento del 25.03 % y 24.02 % en la eficiencia térmica con caudales de 0.015 kg/s y 0.02 kg/s, respectivamente.

Bhalla et al. (2022) analizaron teóricamente la fracción de volumen adecuada para nanopartículas de carbono, aluminio y plata para ser usadas como fluido de trabajo de un CPC. De acuerdo con el análisis, las concentraciones óptimas determinadas fueron 0.7 % para nanopartículas de carbono, 0.07 % para aluminio y 0.05 % para plata para un caudal fijo a 0.002 kg/s. El mejor desempeño térmico fue obtenido con nanopartículas de plata, ya que presentaron una disminución de 12 % en pérdidas térmicas; el incremento en la eficiencia térmica fue 3 % mayor en comparación con carbono y 1 % mejor en comparación con el aluminio.

Khaledi et al. (2022) realizaron pruebas experimentales en un CPC del comportamiento térmico utilizando un fluido base híbrido de etilenglicol-agua en una concentración 10-90 % en volumen y nanopartículas de SiO<sub>2</sub> (90 % v/v) y MWCNT (10 % v/v). La fracción volumétrica del nanofluido fue 0.5 %, 1 % y 1.5 % a cuatro caudales volumétricos: 1 L/min, 1.5 L/min, 2 L/min y 2.5 L/min, de acuerdo con la norma ASHRAE 93-2010. Los autores reportaron un incremento en la eficiencia térmica de 14.27 % con respecto al fluido base con una fracción volumétrica de 1.5 % v/v.

**TABLA 1.** Resumen de las aplicaciones

Tipo de colector	Autor	Tipo de nanofluido	Eficiencia térmica/incremento ( $\Delta$ )
Baja temperatura	Moghadam et al. (2014)	Cu-O-H <sub>2</sub> O	21.8 %
	Sharafeldin y Gróf (2018)	CeO <sub>2</sub> -H <sub>2</sub> O	$\Delta$ 10.4 %
	Sundar et al. (2020)	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -H <sub>2</sub> O + insertos	64.15 %
	Akram et al. (2021)	ZnO- H <sub>2</sub> O y SiO <sub>2</sub> - H <sub>2</sub> O	13.21 % y 14.21 %
Media temperatura	Rehan et al. (2018)	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -H <sub>2</sub> O y Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -H <sub>2</sub> O	13 % y 11 %
	Bellos y Tzivanidis (2019)	Cu, CuO, Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , TiO <sub>2</sub> , Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> y SiO <sub>2</sub> dispersas en Syltherm 800	24.42 %, 19.49 %, 17.16 %, 14.20 %, 14.30 % y 7.28 %
	Heyhat et al. (2020)	CuO-H <sub>2</sub> O	79.29 %
	Abed et al. (2021)	SiO <sub>2</sub> -Therminol VP-1	$\Delta$ 14.62 %
	Mashhadian et al. (2021)	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -H <sub>2</sub> O + MWCNT	$\Delta$ 21 %
	Zafar et al. (2022)	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -H <sub>2</sub> O y MgO-H <sub>2</sub> O	76.28 % y 25.03 %
	Khaledi et al. (2022)	SiO <sub>2</sub> y MWCNT	$\Delta$ 14.27 %

Fuente: Elaboración propia.

El desafío con los nanofluidos que utilicen partículas de tamaño micrométrico es la aglomeración, la sedimentación y la obstrucción de la línea de flujo (Mehta et al., 2022). La Tabla 1 presenta los resultados más sobresalientes en la determinación de la eficiencia térmica o el incremento de la misma en comparación con el fluido base.

## Conclusiones

---

La búsqueda de mayores eficiencias en colectores solares está enfocada a la configuración geométrica, las propiedades del absorbedor solar y los fluidos de trabajo. En los años recientes, a través del uso de nanofluidos, suspensiones de nanopartículas de materiales dieléctricos, metálicos o de una combinación de ambos, en fluidos de trabajo convencionales, se ha demostrado el incremento de la eficiencia de colectores solares de baja y media temperatura. Este efecto se explica por la mejora de la transferencia de calor y del calor específico en los nanofluidos, que como medio efectivo combinan la capacidad de almacenar y transportar la energía térmica con las propiedades termofísicas de metales y dieléctricos, superiores a las de los fluidos de trabajo convencionales.

La posibilidad de producir partículas nanométricas diferentes en virtud de su composición química, tamaño y forma, hace imaginar que los nanofluidos serán un vasto campo de investigación no solo en el área de las aplicaciones termosolares, sino en cualquier otra que involucre el almacenamiento, transporte y transferencia de energía. Una línea de investigación poco explorada y que puede tener un impacto importante en las tecnologías termosolares es la de los colectores solares de absorción directa en la que los nanofluidos, producto de sus propiedades ópticas únicas conferidas por las nanopartículas dispersas, son el elemento fundamental para alcanzar buenas eficiencias.

El aprovechamiento de las fuentes de energía renovable involucra el uso correcto de la tecnología y el incremento en la eficiencia de los dis-

positivos desarrollados para tal fin. El presente capítulo de libro recopila una serie de análisis que tienen como objetivo el aumento de la eficiencia térmica en colectores solares de baja y mediana temperatura, mediante el uso de nanofluidos. En México se han realizado algunos proyectos que combinan la tecnología de concentración solar para procesos de la industria alimentaria y estas investigaciones impactan de forma positiva a los objetivos de sostenibilidad de la Agenda 2030.

## **AGRADECIMIENTOS**

*Los autores agradecen al proyecto de docencia e investigación “Desarrollo de nanofluidos para aplicaciones a tecnología solar concentrada”, perteneciente a la Universidad Autónoma Metropolitana unidad Iztapalapa.*

## REFERENCIAS

- Abed, N., Afgan, I., Iacovides, H., Cioncolini, A., Khurshid, I., y Nasser, A. (2021). Thermal-hydraulic analysis of parabolic trough collectors using straight conical strip inserts with nanofluid. *Nanomaterials*, 11(4), 853. <https://doi.org/10.3390/nano11040853>
- Acosta-Pazmiño, I. P., Rivera-Solorio, C. I., Gijón-Rivera, M. (2021). Scaling-up the installation of hybrid solar collectors to reduce CO2 emissions in a Mexican industrial sector from now to 2030. *Applied Energy*, 298, 117202. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2021.117202>
- Akram, N., Montazer, E., Kazi, S. N., M. Soudagar, M. E., Ahmed, W., Mohd Zubir, M. N., Afzal, A., Ridha Muhammad, M., Muhammad Ali, H., García Márquez, P., y Sami Sarsam, W. (2021). Experimental investigations of the performance of a flat-plate solar collector using carbon and metal oxides based nanofluids. *Energy*, 277, 120452. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.120452>
- Aybar, H. S., Sharifpur, M., Reza Azizian, M., Mehrabi, M., y Meyer, J. P. (2015). A review of thermal conductivity models for nanofluids. *Heat Transfer Engineering*, 36(13), 1085-1110. <https://doi.org/10.1080/01457632.2015.987586>
- Bellos, E., y Tzivanidis, C. (2019). Thermal efficiency enhancement of nanofluid-based parabolic trough collectors. *Journal of thermal analysis and calorimetry*, 135, 597-608. <https://doi.org/10.1007/s10973-018-7056-7>
- Bhalla, V., Khullar, V., y Parupudi, R. V. (2022). Design and thermal analysis of nanofluid-based compound parabolic concentrator. *Renewable Energy*, 185, 348-362. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2021.12.064>
- Cetina-Quiñones, A. J., Bassam, A., Carrillo, J. G. Pérez-Quintanilla, I., Ricalde, L. J., San-Pedro, L. (2022). 4E analysis for the implementation of parabolic trough solar collector in Mexican dairy industry sector: an optimization approach in-

cluding passive heat transfer methods. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 53, 102532. <https://doi.org/10.1016/j.seta.2022.102532>

Chen, M., He, Y., Zhu, J., Shuai, Y., Jiang, B., y Huang, Y. (2015). An experimental investigation on sunlight absorption characteristics of silver nanofluids. *Solar Energy*, 115, 85-94. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2015.01.031>

Chen, M., Wang, X., Hu, Y., y He, Y. (2020). Coupled plasmon resonances of Au thorn nanoparticles to enhance solar absorption performance. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 250, 107029. <https://doi.org/10.1016/j.jqsrt.2020.107029>

Garg, J., Poudel, B., Chiesa, M., Gordon, J. B., Ma, J. J., Wang, J. B., Ren, Z. F., Kang, Y. T., Ohtani, H., Nanda, J., McKinley, G. H., y Chen, G. (2008). Enhanced thermal conductivity and viscosity of cooper nanoparticles in ethylene glycol nanofluid. *Journal of Applied Physics*, 103, 074301. <https://doi.org/10.1063/1.2902483>

Gholinia, M., Ranjbar, A. A., Javidan, M., y Hosseinpour A. A. (2021). Employing a new micro-spary model and (MWCNTs-SWCNTs)-H<sub>2</sub>O nanofluid on Si-IGBT power module for energy storage: a numerical simulation. *Energy Reports*, 7, 6844-6853. <https://doi.org/10.1016/j.egy.2021.10.047>

Gobierno de México. (2023, 11 de septiembre). *Agenda 2030*. <https://www.gob.mx/agenda2030>

Heyhat, M. M., Valizade, M., Abdolhazade, S., y Maerefat, M. (2020). Thermal Efficiency enhancement of direct absorption parabolic trough collector solar collector (DAPTC) by using nanofluid and metal foam. *Energy*, 192, 116662. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.116662>

Khaledi, O., Saedodin, S., y Rostamian, S. H. (2022). Energy, hydraulic exergy analysis of a compound parabolic concentrator using hybrid nanofluid: An experimental study. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 136, 106181. <https://doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2022.106181>

Khan, A I., y Valan Arasu A. (2019). A review of influence of nanoparticle synthesis and geometrical parameters on thermophysical properties and stability of nanofluids. *Thermal Science and Engineering Progress*, 11, 334-364. <https://doi.org/10.1016/j.tsep.2019.04.010>

- Kim, H. J., y Jo, B. (2018). Anomalous increase in specific heat of binary molten salt-based graphite nanofluids for thermal energy storage. *Applied Sciences*, 8(8), 1305. <https://doi.org/10.3390/app8081305>
- Kole, M., y Dey, T. K. (2013). Thermal performance of screen mesh wick heat pipes using water-based copper nanofluids. *Applied Thermal Engineering*, 50, 763-770. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2012.06.049>
- Lara, G., y Alvarado, D. (2021). *Dairy and products annual*. United States Department of Agriculture Foreign Agricultural Service. [https://apps.fas.usda.gov/newgainapi/api/Report/DownloadReportByFileName?fileName=Dairy%20and%20Products%20Annual\\_Mexico%20City\\_Mexico\\_10-15-2021](https://apps.fas.usda.gov/newgainapi/api/Report/DownloadReportByFileName?fileName=Dairy%20and%20Products%20Annual_Mexico%20City_Mexico_10-15-2021)
- Lee, S. H., Choi, T. J., y Jang, S. P. (2016). Thermal efficiency comparison: surfaces-based receivers with conventional fluids and volumetric solar receiver with nanofluids. *Energy*, 115, 404-417. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2016.09.024>
- Li, X., Chang, H., Zeng, L., Huang, X., Li, H., Li, R., y Xi, Z. (2020). Numerical analysis of photothermal conversion performance of MXene nanofluid in direct absorption solar collectors. *Energy Conversion and Management*, 226, 113515. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2020.113515>
- Liu, S., Ma, S., Liu, Y., y Wang, Y. (2022). Analysis of the energy conversion properties and applications of nanofluids: A review. *Energy Reports*, 8, 175-184. <https://doi.org/10.1016/j.egy.2022.10.207>
- Ma, B., Shin, D., y Banerjee, D. (2020). Synthesis and characterization of molten salt nanofluids for thermal energy storage application in concentrated solar power plants-mechanistic understanding of specific heat capacity enhancement. *Nanomaterials*, 10(11), 2266. <https://doi.org/10.3390/nano10112266>
- Mashhadian, A., Heyhat, M. M., y Mahian, O. (2021). Improving environmental performance of a direct absorption parabolic trough collector by using hybrid nanofluid. *Energy Conversion and Management*, 244, 114450. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2021.114450>
- May T. O., Bassam, A., Ricalde, I. J., Jaramillo, O. A., Flota, M., y Escalante Soberanis, M. A. (2020). Environmental economic optimization for implementation of parabolic collector in the industrial process heat generation: case study of Mexico

- climate. *Journal of Cleaner Production*, 242, 118538. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.118538>
- Mehta, B., Subhedar, D., Panchal, H., y Said, Z. (2022). Synthesis, stability, thermophysical properties and heat transfer applications of nanofluid-A review. *Journal of molecular liquids*, 364, 120034. <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2022.120034>
- Moghadam, A. J., Farzane-Gord, M., Sajadi, M., y Hiseyn-Zadeh, M. (2014). Effects of CuO/water nanofluid on the efficiency of a flat-plate solar collector. *Experimental Thermal and Fluid Sciences*, 58, 9-14. <https://doi.org/10.1016/j.expthermflusci.2014.06.014>
- Nazifard, M., Nematollahi, M., Jafapur, K., y Suh, K. Y. (2012). Numerical simulation of water-based alumina nanofluid in subchannel geometry. *Science and Technology of Nuclear Installations*, 2012. <https://doi.org/10.1155/2012/928406>
- Pomianowski, M. Z., Johra, H., Marszal-Pomianowska, A., y Zhang, C. (2020). Sustainable and energy-efficient domestic hot water systems: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 128, 109900. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.109900>
- Rehan, M. A., Ali, M., Sheikh, A. S., Khalil, S., Chaudhary, G. Q., Rashid, T. U., y Shehryar, M. (2018). Experimental performance analysis of low concentration ratio solar parabolic trough collector with nanofluids in winter conditions. *Renewable Energy*, 118, 742-751. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2017.11.062>
- Sharafeldin, M. A., y Gróf, G. (2018). Experimental investigation of flat-plate solar collector using CeO<sub>2</sub>-water nanofluid. *Energy Conversion and Management*, 155, 32-41. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2017.10.070>
- Shin, D., y Banerjee, D. (2015). Enhanced thermal properties of SiO<sub>2</sub> nanocomposite for solar thermal energy storage application. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 84, 898-902. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2015.01.100>
- Sinha, K., Kavlicoglu, B., Liu, Y., Gordaninejad, F., y Graeve, O. A. (2009). A comparative study of thermal behavior of iron and copper nanofluids. *Journal of Applied Physics*, 105, 064307. <https://doi.org/10.1063/1.3225574>

- Sundar, L. S., Efera Sintie, Y., Said, Z., Singh, M. K., Punnaiah, V., y Sousa, A. C. M. (2020). Energy, efficiency, economic impact, and heat transfer aspects of solar flat plate collector with Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> nanofluids and wire coil with core rod inserts. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 40, 100772. <https://doi.org/10.1016/j.seta.2020.100772>
- Tagle, P. D., Agraz, A., y Rivera, C. I. (2016). Study of applications of parabolic trough solar collector technology in Mexican industry. *Energy Procedia*, 91, 661-667. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2016.06.227>
- Wang, Q., Yang, L., Zhao, N., Xu, G., Song, J., Li, X., y Liu, S. (2023). A review of applications of plasmonic and convectional nanofluid in solar heat collection. *Applied Thermal Engineering*, 219, 119476. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2022.119476>
- Xuan, Y., y Li, Q. (2000). Heat transfer enhancement of nanofluids. *International Journal of Heat and Fluid Flow*, 21(1), 58-64. [https://doi.org/10.1016/S0142-727X\(99\)00067-3](https://doi.org/10.1016/S0142-727X(99)00067-3)
- Zafar, M. F., Ali, M., Akhter, J., Kaleem, M., y Sheikh, N. A. (2022). Characterization and performance investigation of metallic oxides based nanofluids in compound parabolic concentrating solar collector. *Sustainable Energy Technologies and Assessment*, 54, 102786. <https://doi.org/10.1016/j.seta.2022.102786>
- Zeng, J., y Xuan, Y. (2018). Enhanced solar thermal conversion and thermal conduction of MWNT-SiO<sub>2</sub>/Ag binary nanofluids. *Applied Energy*, 212, 809-819. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.12.083>
- Zhang, W., He, H., Li, H., Duan, L., Zu, L., Zhai, Y., Li, W., Wang, L., Fu, H., y Zhao, D. (2021). Visible-light responsive TiO<sub>2</sub>-based materials for efficient solar energy utilization. *Advances Energy Materials*, 11, 2003303. <https://doi.org/10.1002/aenm.202003303>

# CAPÍTULO 4.

## SUSTENTABILIDAD ENERGÉTICA CON TECNOLOGÍAS DE ALMACENAMIENTO ELECTROQUÍMICO

**Viridiana Aca López,<sup>1</sup> Erick Leonel Espinosa Villatoro,<sup>2</sup>  
Juan David Garay Marín,<sup>3</sup> Óscar Pérez Díaz,<sup>4</sup> Enrique Quiroga González<sup>1\*</sup>**

<sup>1</sup> Instituto de Física, Benemérita Universidad Autónoma de Puebla. Puebla, Puebla, México. 72000.

<sup>2</sup> Stanford Synchrotron Radiation Lightsource, SLAC National Accelerator Laboratory. Menlo Park, California, Estados Unidos, 94025.

<sup>3</sup> Instituto Tecnológico Nacional de México campus Boca del Río. Boca del Río, Veracruz, México. 94290.

<sup>4</sup> Instituto Nacional de Astrofísica, Óptica y Electrónica. Santa María Tonantzintla, Puebla, México. 72840.  
\*equiroga@ieee.org

### Resumen

**U**no de los puntos clave para el uso eficiente de energía y para el desarrollo de nuevas tecnologías de generación y electromovilidad es el almacenamiento de energía. Dentro de los diferentes conceptos de almacenamiento, el electroquímico de energía es el que presenta las mayores eficiencias y densidades energéticas. No se podría concebir la electrónica móvil ni los autos eléctricos sin baterías recargables. Por otro lado, tampoco sería posible tener sistemas de energía renovable aislados de la red eléctrica que funcionen de manera autónoma, de-

bido a su intermitencia. Para esta última aplicación, el espacio necesario para la instalación de un sistema de almacenamiento juega un rol importante, por lo que sistemas con alta densidad energética son usualmente la opción recurrida. En el presente capítulo se expone una paleta de dispositivos electroquímicos de almacenamiento de energía, denotando sus propiedades, así como ventajas, disponibilidad y costos, para apoyar en la toma de decisiones en el desarrollo de aplicaciones energéticamente sustentables.

Palabras clave: **Almacenamiento electroquímico de energía; sustentabilidad energética; baterías.**

---

### **Abstract**

One of the key points for an efficient energy usage and to develop new technologies for energy generation and for electromobility, is energy storage. Among the different energy storage concepts, the electrochemical energy storage is the one with the highest efficiencies and energy densities. One could not think about mobile electronics, neither about electric cars, without rechargeable batteries. On the other hand, it could also not be possible to have autonomous renewable energy systems, due to their intermittency. For this application, the necessary space to install an energy storage system plays an important role; thus, systems with high energy storage densities are commonly the selected option. In the present chapter, a palette of electrochemical energy storage devices is presented, denoting their properties, advantages, availability and costs, to help to take decisions when developing energetically sustainable applications.

Keywords: **Electrochemical energy storage; energy sustainability; batteries.**

## Introducción

---

Son tres los pilares que hay que cuidar para un desarrollo energéticamente sustentable: la generación de energía, el almacenamiento de esta y su uso. Es importante que la energía provenga de una fuente “limpia” (que su generación cause un mínimo impacto ambiental) y “renovable” (que su origen sea casi ilimitado, como lo es el viento, la luz del Sol, las mareas y el calor interno de la Tierra) para que sea sostenible. En el otro extremo, el uso de la energía producida también debe ser consciente, cuidando la eficiencia. Esto, porque a pesar de que el producirla sea relativamente limpio, su huella ambiental no es cero. Entre menos energía consumamos, menor será la necesidad de generarla, y por ende menor será la necesidad de fabricar e instalar plantas de generación.

Finalmente, entre la fuente de energía y el uso eficiente de la misma se encuentra el concepto de almacenamiento de energía, que no es otra cosa que guardarla para su posterior uso. El guardar energía en un dispositivo permite transportarla de un lado a otro, evitar su desperdicio almacenando cualquier energía producida en exceso, tenerla disponible aun cuando haya intermitencia en su generación, y tener una fuente de energía cuando no exista otra fuente en un sistema aislado.

No es concebible un futuro energético sostenible sin almacenamiento de energía, y para esto se requieren dispositivos de almacenamiento. Dentro de los más comunes, con los que tenemos contacto diariamente, se encuentran las baterías recargables, también llamadas secundarias. Estas son un medio de almacenamiento electroquímico, es decir, requieren de reacciones químicas que solo se posibilitan al conectarse a un circuito eléctrico externo. Existe una diferencia de potencial entre sus electrodos (cátodo y ánodo), y se produce una corriente eléctrica de origen electroquímico al conectar un circuito externo (algo que necesitamos alimentar de energía).

El almacenamiento electroquímico es el que presenta las mayores eficiencias y densidades energéticas, comparado con otros tipos de almacenamiento. Su existencia ha venido a revolucionar a la electrónica, posibilitando la electrónica móvil, y está permitiendo planear una transición de movilidad con autos eléctricos (electromovilidad). De manera adicional, sistemas electroquímicos de almacenamiento posibilitan el desarrollo de sistemas de energía renovable aislados de la red eléctrica. El almacenamiento electroquímico de energía atiende sus problemas de intermitencia, además de que lo hace ocupando poco espacio, por su alta densidad energética. Existe una gran variedad de tipos de baterías recargables y cada una tiene su nicho de aplicación, ya sea por su potencia, su densidad energética, sus ciclos de vida, su seguridad, su costo o su carácter amigable con el medioambiente. En el presente capítulo se expone una paleta de dispositivos electroquímicos de almacenamiento de energía, denotando sus propiedades, así como sus ventajas, disponibilidad y costos, para apoyar en la toma de decisiones en el desarrollo de aplicaciones energéticamente sustentables.

## **Baterías recargables con electrolito ácido**

---

### **Batería de plomo-ácido**

La batería de plomo-ácido (Pb-ácido) es una batería recargable, considerada la primera de este tipo. Están presentes en el mercado desde hace 160 años aproximadamente. Su éxito a través de los años probablemente se deba a las ventajas que ofrecen, por ejemplo: son de fácil fabricación, son robustas para cualquier tipo de operación (rápida o convencional), soportan altas tasas de descarga y a pesar de ser muy pesadas no requieren de un contrapeso adicional en el caso de ser usadas para energizar maquinaria pesada. Por otro lado, entre sus desventajas se encuentran que son fabricadas con materiales altamente contaminantes y el número de ciclos de carga/descarga es limitado, además de requerir mantenimiento cada determinado tiempo.

La demanda de las baterías Pb-ácido es amplia; de esta manera, se pueden encontrar en automóviles convencionales, bicicletas eléctricas, montacargas y otros tipos de vehículos comerciales, además de usos estacionarios incluyendo UPS (Sistema de Alimentación Ininterrumpida), telecomunicaciones y almacenamiento de energía alternativa. Para satisfacer esta demanda existe un gran número de compañías que se dedican a manufacturarlas. Las cinco principales son Panasonic Corporation, GS Yuasa Corporation, EnerSys, East Penn Manufacturing Co. y Leoch International Technology Limited (Mordor Intelligence, 2023).

Los costos de estas baterías se estiman entre \$150 y \$200 USD/kWh, dependiendo del fabricante, la capacidad de las celdas y el número de ciclos carga/descarga que dure (Keshan et al., 2016).

La estructura de una batería Pb-ácido se basa en el apilamiento de un determinado número de celdas unidas por medio de barras metálicas. Cada celda está formada por un par de placas, una positiva cubierta de una pasta de dióxido de plomo ( $PbO_2$ ) y una negativa hecha de plomo esponjoso (Pb). Las placas se encuentran separadas por un material aislante (separador) y están inmersas en una solución acuosa con ácido sulfúrico (electrolito), de ahí que reciben el nombre de baterías de Pb-ácido. Cuando las placas se encuentran en ese estado, es decir, con  $PbO_2$  en la placa positiva, Pb en la placa negativa y la concentración de ácido es alta, se dice que la batería está cargada. Por otro lado, al haber sulfato de plomo ( $PbSO_4$ ) en ambos electrodos y la concentración de ácido es baja, se dice que la batería está descargada. El cambio en la densidad del electrolito puede servir como indicador del estado de carga de la batería y de si es necesario dar mantenimiento o reemplazarla (Hioki, 2020). La reacción electroquímica completa que se lleva a cabo durante la carga/descarga es (Ecuación 1):



Por otro lado, las baterías de Pb-ácido pueden clasificarse en de ciclo corto (*shallow-cycle*) y de ciclo profundo (*deep-cycle*) de descarga. Las primeras están pensadas para aportar energía puntualmente, las placas que la forman son finas y no permiten hacer ciclos profundos, pero sí fuertes demandas de corriente durante breves periodos, lo que se conoce como potencial de arranque (CCA). Cuanto mayor sea el CCA, mayor es la capacidad de arranque de un automóvil convencional, con el motor en frío.

Las baterías de ciclo profundo o *deep-cycle* están diseñadas para soportar repetidos ciclos de carga y descarga hasta por 80 % de su capacidad sin afectar su desempeño. Sus placas son más gruesas y con alta densidad del material activo, diseñadas para proveer cantidades relativamente bajas de corriente por largos periodos. El uso de este tipo de baterías se encuentra limitado por su peso excesivo y su lenta recarga.

El potencial de una batería de Pb-ácido puede ser de 6 V, 12 V o algún múltiplo de 2 ya que el potencial de cada celda es de 2 V. Por otro lado, la densidad de energía por peso es de 40 Wh/kg.

## Baterías recargables con electrolito básico

---

### Baterías de NiCd

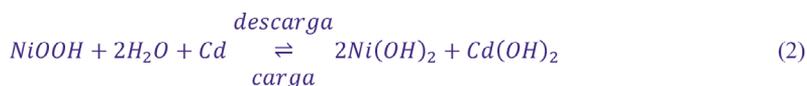
Después del desarrollo de la batería de plomo-ácido (Pb-ácido) pasaron aproximadamente 50 años antes de que la segunda batería recargable estuviera comercialmente disponible. Esta fue la de níquel-cadmio (NiCd), inventada por el científico sueco Waldemar Jungner en 1899 (Lopes y Stamenkovic, 2020), que ofrecía muchas ventajas sobre las baterías de Pb-ácido, aunque sus costos de producción eran elevados (Bukhari et al., 2015; Liang et al., 2019). La primera batería de NiCd fue la ventilada de bolsillo, caracterizada por su alta fiabilidad, robustez y larga duración. Este modelo fue capaz de operar eficazmente en un amplio rango de temperaturas.

Posteriormente se desarrolló la de placa sinterizada, cuya densidad de energía es superior y puede llegar a ser hasta 50 % mayor que la de su predecesor. La batería de placa sinterizada mantiene la mayoría de las características favorables de la batería de bolsillo, aunque su precio generalmente es más elevado.

El siguiente gran avance en el sistema NiCd fueron las baterías selladas, las cuales incluyen características de diseño específicas para evitar la acumulación de presión en la batería, causada por la gasificación durante la sobrecarga (Beard y Reddy, 2019; Liang et al., 2019). Las pilas y baterías de NiCd selladas están disponibles en diferentes tipos de construcciones, siendo las cilíndricas las más comunes. Además, se producen baterías de botón más pequeñas y rectangulares (Shukla et al., 2001; Zhou et al., 2022). Sin embargo, es importante mencionar que estas cada vez se usan menos (a favor de las baterías de NiMH) debido a su efecto memoria y al cadmio, que es muy contaminante (Shukla et al., 2001).

En los últimos años el mercado de baterías recargables pequeñas, como las de níquel-cadmio (NiCd), hidruro metálico de níquel (NiMH) e iones de litio (Li-ion) ha experimentado un aumento en su demanda (~20 %) debido en gran parte a su uso por ejemplo en teléfonos inteligentes, computadoras portátiles y más recientemente en vehículos eléctricos e híbridos. En una celda NiCd, el ánodo está compuesto por cadmio y el cátodo por óxidos de níquel. Las características de una batería NiCd se pueden encontrar en la Tabla 1 (Shukla et al., 2001; Zhao et al., 2022). Las baterías recargables de NiCd son fabricadas por varias compañías, incluidas Sanyo, Panasonic, Probattery, Tenergy, Moonrays, entre otras (Lin et al., 2022).

Las reacciones electroquímicas básicas que ocurren durante los procesos de carga y descarga de una batería NiCd se ilustran en la Ecuación 2. Al momento de la descarga, el óxido de níquel trivalente se reduce a hidróxido de níquel divalente con el consumo de agua y el cadmio metálico se oxida para formar hidróxido de cadmio. En la carga, se producen las reacciones opuestas (Lin et al., 2022; Lopes y Stamenkovic, 2020).



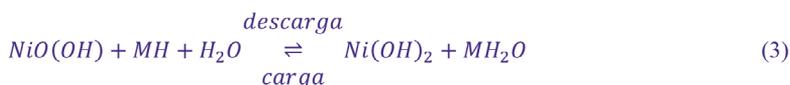
## Baterías de NiMH

La batería recargable sellada de hidruro metálico (MH) es una tecnología de almacenamiento de energía eléctrica que ha ganado popularidad en las últimas décadas debido a su alta densidad de energía y bajo costo. Fue en 1989 cuando la Yuasa Battery Company presentó las primeras baterías de hidruro de níquel-metal (NiMH) comercialmente disponibles, gracias a las investigaciones lideradas por su inventor Masahiko Oshitanu (Lin et al., 2022; Zhou et al., 2022). En su diseño, una batería de NiMH cuenta con un ánodo compuesto por una aleación  $\text{AB}_5$  o  $\text{AB}_2$ , donde A está constituido por una aleación de tierras raras: La, Ce, N y Pr (lantano, cerio, nitrógeno y praseodimio), mientras que B es una aleación de Ni, Co, Mn y Al (níquel, cobalto, manganeso y aluminio). El cátodo, por su parte, es idéntico al de las baterías de NiCd (níquel/cadmio), mientras que el electrolito es una solución alcalina, generalmente KOH (acuoso) (Fetcenko et al., 2007; Lopes y Stamenkovic, 2020).

La elección de la aleación utilizada en el ánodo determina en gran medida las características de la batería. La aleación  $\text{AB}_2$ , por ejemplo, ofrece una mayor capacidad por unidad de peso y volumen en un rango moderado de temperatura que la aleación  $\text{AB}_5$ , aunque esta última tiene una densidad de capacidad ligeramente superior. En cualquier caso, las baterías de NiMH tienen casi el doble de densidad de energía que las baterías de NiCd, lo que las hace ideales para su uso en dispositivos de consumo, como los que se alimentan con baterías AA o AAA. En la Tabla 1 se resumen algunas de las características de estas baterías.

Generalmente se utiliza una aleación de lantano-níquel ( $\text{LaNi}_5$ ), conocida como la base  $\text{AB}_5$ , y aleaciones compuestas de Ti y Zr (titanio y circonio) conocidas como las de clase  $\text{AB}_2$ . La aleación  $\text{AB}_2$  tiene una mayor capacidad por unidad de peso y volumen (360-400 Ah/kg y

2 500-2 800 Ah/L, respectivamente) en un rango moderado de temperatura que la aleación AB<sub>5</sub> con una capacidad específica de 270-290 Ah/kg y una densidad de capacidad de 2 200-2 400 Ah/L. Estas características hacen de las baterías de NiMH unas de las recargables más disponibles en el mercado. Compañías como Panasonic, Energizer, Duracell y Rayovac han apostado por esta tecnología y ofrecen baterías de NiMH de distintos tamaños y precios. En cuanto a las reacciones electroquímicas (Ecuación 3) que se producen durante la descarga, estas consisten en la liberación de electrones del ánodo y la aceptación de los mismos por el cátodo, lo que genera una corriente eléctrica que puede ser utilizada para alimentar un dispositivo. Durante la recarga, el proceso se invierte y los electrones regresan al ánodo, lo que permite recuperar la energía almacenada en la batería (Shukla et al., 2001; Yartys et al., 2016; Young, 2018):



Para lograr un buen equilibrio entre las diversas propiedades electroquímicas, una aleación tipo AB<sub>5</sub> convencional usualmente contiene alrededor de 11, 1 y 3 % en peso de cobalto (Co) (USD \$30/kg), praseodimio (Pr) (USD \$132/kg) y neodimio (Nd) (USD \$66/kg), respectivamente. Los costos de estos tres elementos comparten el 25 % del costo total (Lopes y Stamenkovic, 2020; Young, 2016a).

Las baterías recargables de NiMH son dispositivos de almacenamiento de energía ampliamente utilizados en una variedad de aplicaciones con recientes avances importantes que han mejorado significativamente el desempeño de estas baterías (Fetcenko et al., 2007). A través del desarrollo de nuevos cátodos, ánodos y electrolitos, la potencia de las baterías de NiMH ha aumentado de menos de 200 a 1 200 Wh/kg comercialmente hasta 2 000 Wh/kg (Fetcenko et al., 2007). Adicionalmente, se ha logrado una mejora significativa en la capacidad del ánodo mediante el

uso de un líquido iónico como electrolito en lugar de la solución acuosa de KOH. Por su parte, el uso de ánodos de silicio (Si) de ultra alta capacidad con 3 635 mAh/g y la expansión de la ventana de potencial ha sido posible gracias a esta innovación. Estos avances representan importantes mejoras en la capacidad y el rendimiento de las baterías de NiMH y abren nuevas oportunidades para su uso en una amplia gama de aplicaciones de almacenamiento de energía (Yartys et al., 2016; Young, 2016b; 2018). La Tabla 1 presenta un comparativo de las propiedades de baterías NiCd y NiMH, siendo las últimas una mejora de las primeras.

**TABLA 1.** *Capacidades de rendimiento y características críticas de baterías de NiCd y NiMH*

Parámetros de rendimiento	NiCd	NiMH
Energía específica (Wh/kg)	45-65	60-95
Densidad de energía (Wh/L)	150-200	310-360
Ciclo de vida (hasta el 80 % de su capacidad)	1 100-1 500	600-1 100
Autodescarga a 20 °C/mes (%)	<20	<25
Tiempo de carga rápida (h)	1	1
Voltaje nominal de la celda (V)	1.20	1.20
Rango de temperatura de operación (°C)	-20-60	-20-60
Costo de adquisición (\$/Wh, en dólares)	0.5	0.5
Tolerancia de sobrecarga	Moderado	Bajo

Fuente: Información tomada de Shukla et al. (2001), Young, 2016a y Zhao et al. (2022).

## Baterías de ion litio

### Baterías de ion litio con cátodos de óxidos y fosfatos

#### *Baterías de LiCoO<sub>2</sub>*

El LiCoO<sub>2</sub> (LCO), introducido por Goodenough como material catódico, fue la primera y la más exitosa forma comercial de cátodos de óxido de metal de transición en las baterías de ion litio (LIB). Originalmente fue comercializado por SONY y aún se utiliza en las baterías co-

merciales de ion litio de hoy en día. El Co y el Li, ubicados en sitios octaédricos, ocupan capas alternas y forman una simetría hexagonal. El LCO es un material de cátodo muy atractivo porque tiene varias características deseables que incluyen alto potencial de descarga, alta capacidad de energía, buen rendimiento de carga/descarga, relativa facilidad de síntesis y un alto voltaje de descarga estable (Bensalah y Dawood, 2016; Manthiram y Goodenough, 2021). El  $\text{LiCoO}_2$  tiene una capacidad teórica de  $274 \text{ mAhg}^{-1}$  con voltaje nominal de 3.7 V, sin embargo, solo la mitad de los iones de litio pueden ser extraídos o insertados, lo que se refleja en una capacidad de  $140 \text{ mAhg}^{-1}$ , que es el 50 % de la capacidad teórica del material. Lo anterior, principalmente por un reordenamiento a partir de dicha composición, generando una distorsión estructural de hexagonal a monoclinica (Bensalah y Dawood, 2016; Nitta et al., 2015).

Las principales limitaciones son el alto costo del Co, la baja estabilidad térmica, la alta toxicidad y la rápida pérdida de capacidad por ciclo a altas tasas de corriente o durante ciclos profundos. Durante las últimas dos décadas se han llevado a cabo investigaciones exhaustivas para encontrar materiales de cátodos con mayor capacidad y potencial que el  $\text{LiCoO}_2$  (Bensalah y Dawood, 2016; Nitta et al., 2015). Las baterías de cátodo de  $\text{LiCoO}_2$  no deberían ser descargadas a velocidades más allá de 1 C, por lo que se recomienda descargas a 0.8 C. Por lo anterior, no son confiables como baterías de almacenamiento para energías renovables, en donde se necesita por ciertos momentos suministrar a la red eléctrica toda la capacidad almacenada en la menor cantidad de tiempo (batería de potencia); sin embargo, es la química dominante en la electrónica portátil de fabricantes como Apple, Lenovo, Acer, Dell, HP y Toshiba (Zubi et al., 2018).

#### *Baterías de $\text{LiMnO}_4$*

En la búsqueda de solucionar los inconvenientes de la difusión de los iones de litio en las estructuras de los óxidos laminares, se propone sustituir estos por otros cátodos de estructura tridimensional, por ejemplo, de tipo espinela. Las espinelas cumplen con la forma  $(\text{LiM}_2\text{O}_4)$ , donde M

es un metal con dos estados de oxidación. El  $\text{LiMn}_2\text{O}_4$ , o comúnmente conocido como LMO, es la espinela de manganeso (Mn) más usada. El manganeso tiene los estados de oxidación +3 y +4. Su estructura consiste en octaedros con estequiometría  $\text{M}_2\text{O}_4$ , en la que el espacio intersticial interconectado permite una rápida difusión tridimensional del litio (Nitta et al., 2015).

En 1996, Moli Energy comercializó una celda de iones de litio con óxido de litio y manganeso como material de cátodo. La estructura de espinela tridimensional mejora el flujo de iones en el electrodo, lo que resulta en una menor resistencia interna y un mejor manejo de la corriente. En una batería tipo 18650, el Li-manganeso se puede descargar a corrientes de 20-30A con una acumulación moderada de calor. También es posible aplicar pulsos de carga de un segundo de hasta 50A. La espinela proporciona un voltaje superior al de los óxidos laminares y muestra una excelente estabilidad estructural con un voltaje de descarga de alrededor de 4 V, pero con capacidad y ciclabilidad inferior (ver Tabla 1).

Para mejorar su desempeño en el ciclado se han realizado sustituciones parciales del Mn por cationes como:  $\text{Zn}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Co}^{3+}$ ,  $\text{Cr}^{3+}$ ,  $\text{Al}^{3+}$  y  $\text{Ti}^{4+}$  (Bensalah y Dawood, 2016). La capacidad real de una buena espinela de manganeso, que depende del proceso de síntesis, está comprendida entre 100 y 140  $\text{mAhg}^{-1}$  y su vida es de 1 000 a 1 500 ciclos (Zubi et al., 2018). El  $\text{LiMn}_2\text{O}_4$  es más barato, menos tóxico y reactivo que el  $\text{LiCoO}_2$ , pero proporciona una menor capacidad ya que el material cambia de fase durante el ciclado cuando la intercalación/desintercalación de  $\text{Li}^+$  ocurre por debajo de 3 V, provocando una pérdida relativamente alta de capacidad por ciclo.

#### *Baterías de $\text{LiFePO}_4$*

La estructura de tipo olivino  $\text{LiMPO}_4$  (M = Fe, Mn, Co) es el material catódico más prometedor por su destacado rendimiento electroquímico, ciclabilidad, alta velocidad de carga/descarga y capacidad especí-

fica. El olivino puede describirse como esquinas octaédricas de  $\text{MO}_6$  y esquinas tetraédricas de  $\text{PO}_4$  que comparten el elemento oxígeno. Los compuestos con esta estructura tienen varias ventajas sobre otros materiales de cátodo, incluso su estructura de material apenas cambia durante la intercalación y la desintercalación de iones de litio (Nitta et al., 2015; Satyavani et al., 2016).

El  $\text{LiFePO}_4$  (LFP) ha recibido la mayor atención debido a una serie de características deseables como bajo costo, no toxicidad, muy baja pérdida de capacidad por ciclo y buena estabilidad térmica y química (Nitta et al., 2015). El principal inconveniente que se presentaba en el fosfato de hierro litio,  $\text{LiFePO}_4$ , era su bajo rendimiento electroquímico a temperatura ambiente debido a la baja difusión de iones de litio y la mala conductividad electrónica (Nitta et al., 2015; Satyavani et al., 2016). Desde entonces hasta su comercialización actual en baterías de ion litio (Yok Energy, Fullriver, Enerland, A123 Systems, LiFeBATT, etc.) se han llevado a cabo estudios de cómo afecta la síntesis del material, la introducción de dopantes, la presencia de recubrimientos y la morfología de las partículas en el desempeño de dicho compuesto.

El  $\text{LiFePO}_4$  es por excelencia usado como cátodo para batería de potencia, siendo la única batería que soporta altas corrientes de descarga llegando a velocidades de hasta 25 C. También puede ser usado en sistemas de almacenamiento de energía como batería de potencia. Dentro de las químicas de las baterías de iones de litio, se estima que la tecnología de  $\text{LiFePO}_4$  se utilizará más que otras químicas para almacenamiento estacionario, y se convertirá en la principal opción al menos hasta 2030.

## **Baterías de óxidos combinados**

El NMC (níquel, manganeso, cobalto,  $\text{LiNiMnCoO}_2$ ) con voltaje nominal de 3.65 V, tiene mayor capacidad y estabilidad térmica que los compuestos que la conforman por separado de  $\text{LiCoO}_2$ ,  $\text{LiNiO}_2$  y

$\text{LiMnO}_2$ , además se produce a un menor costo. La motivación para mezclar estos compuestos es lograr un mejor desempeño del que se obtiene de manera individual con cada uno de ellos (Chikkannanavar et al., 2014; Manthiram et al., 2017).

El NCA (níquel, cobalto, aluminio,  $\text{LiAl}_x\text{Co}_y\text{Ni}_z\text{O}_2$ ), comparado con otros grupos de cátodos de intercalación, ofrece una combinación de alta capacidad reversible (200-250 mAh  $\text{g}^{-1}$ ), alto voltaje de operación ( $\sim 3.8$  V vs.  $\text{Li/Li}^+$ ) y mejor estabilidad química sin pérdida de oxígeno, similar al NMC, solo que agregando aluminio para mejorar su estabilidad térmica y reducción de costo (Zeng et al., 2019). Sin embargo, dado que también comparte los problemas con NMC, los voltajes de funcionamiento suelen ser inferiores a 4.3 V, lo que limita su capacidad por debajo de 70 % del valor teórico.

Tanto las celdas NMC como las NCA son las baterías establecidas como material catódico por el que está apostando el mercado de vehículos eléctricos. Las marcas líderes en este ramo solo varían un poco la química del cátodo o en su caso agregan silicio al ánodo de grafito, dominando desde 2004 en la movilidad eléctrica híbrida (PHEV) como el Toyota Prius, Chevrolet Volt, VW Golf GT, etc., y completamente eléctricos (EV) como VW e-Golf, Nissan LEAF, Hyundai Ioniq Electric, BMW i3, Mercedes-Benz Clase B E Drive, etc. (Zubi et al., 2018; Chen et al., 2019).

En diciembre de 2018, BloombergNEF publicó los resultados de su novena encuesta de precios de baterías (Battery Price Survey). El precio anual ha sido un importante indicador en la industria y la caída de precios ha sido más que remarcable. El precio de 2010 a 2018 ha sufrido una depreciación de más de 70 %. En la Tabla 2 se presenta un comparativo de las características de diferentes cátodos de baterías con base en óxidos y fosfatos.

**TABLA 2.** Capacidad gravimétrica, voltaje de operación y densidad energética de algunos materiales de cátodos

Cátodo de batería de ion Li	Capacidad mAhg <sup>-1</sup>	Voltaje promedio de operación (V)	Ciclabilidad ciclos	Densidad de energía	
				Wh kg <sup>-1</sup>	Wh L <sup>-1</sup>
LiCoO <sub>2</sub> (Bensaïah y Dawood, 2016)	151	4.0	500-1 000	602	3 073
LiAl <sub>0.05</sub> Co <sub>0.16</sub> Ni <sub>0.08</sub> O <sub>2</sub> (NCA) (Zeng et al., 2019)	195	3.8	1 000-1 500	742	3 784
LiMn <sub>2</sub> O <sub>4</sub> (Zubi et al., 2018)	119	4.05	1 000-1 500	480	2 065
LiNi <sub>1/3</sub> Mn <sub>1/3</sub> Co <sub>1/3</sub> O <sub>2</sub> (NMC 333) (Zeng et al., 2019)	153	3.85	1 000-2 000	588	2 912
LiNi <sub>x</sub> Mn <sub>y</sub> Co <sub>z</sub> O <sub>2</sub> (Zeng et al., 2019)	220	4.0	1 500-2 000	720	3 600
LiFePO <sub>4</sub> (Nitta et al., 2015)	161	3.40	2 000-3 000	549	1 976

Fuente: Elaboración propia.

### Baterías de Li-S

El concepto de utilizar azufre (S) como electrodo en baterías fue introducido 1962 (Danuta y Juliusz, 1962). Este tipo de baterías es capaz de proporcionar capacidades teóricas de 2 500 Wh/kg a 2 800 Wh/l (Peramunage y Licht, 1993). Estos sistemas pueden operar en un amplio rango de temperatura que va desde los -40 °C hasta los 80 °C. Por otro lado, su proceso de fabricación es compatible con baterías de ion litio, por lo que la producción no sufriría cambios que se vean reflejados en el costo final (Zhang et al., 2017).

A pesar de lo anterior, debido a la naturaleza aislante del S es necesario adicionar grandes cantidades de material conductor (Dean, 1985). Por otro lado, también se presenta el decaimiento de la capacidad debido a la generación de varios polisulfuros intermedios solubles (Rauh et al., 1977), los cuales dan lugar a un mecanismo de transporte que reduce la utilización de material activo en el proceso de descarga haciendo que la eficiencia coulombica se reduzca rápidamente (Rao y Shropshire,

1981). Es así que se están probando diferentes conceptos de baterías de Li-S, incluso mezclando el azufre con otros materiales activos como el  $\text{LiFePO}_4$ , para mejorar la velocidad de carga/descarga de estas baterías (Garay-Marín et al., 2021). Países como Estados Unidos, Japón y Rusia, además de la Unión Europea y compañías como Polyplus (Estados Unidos), Oxis Energy (Reino Unido) y Sion Power (Estados Unidos) (Zhang et al., 2017), financian el desarrollo de este tipo de baterías.

### **Baterías de ion litio con ánodo de Si**

Por lo general las baterías de litio tienen un ánodo hecho de grafito, que tiene una capacidad de alrededor de 370 mAh/g. Este material es abundante y se puede conseguir tanto natural como sintetizado, a la vez que presenta una buena estabilidad química y buen rendimiento al usarse en baterías. Sin embargo, su capacidad ya no está siendo suficiente para satisfacer las necesidades energéticas de muchas aplicaciones actuales.

El silicio (Si), por su parte, posee una capacidad de 4 200 mAh/g (Quiroga-González et al., 2011). A pesar de ser un material abundante en la corteza terrestre y de ser material básico en la electrónica, no puede ser utilizado como electrodo en baterías. Lo anterior se debe a la expansión de volumen (300 %) que sufre el Si debido a la inserción de Li en la estructura (Zhao, 2015), produciendo fracturas en el material pulverizándolo en pocos ciclos de carga/descarga (Liang et al., 2014), traduciendo-se en pérdida de contacto eléctrico entre el Si y el colector de corriente, perdiendo capacidad de almacenamiento. Lo anterior sugirió que existe un tamaño límite de partícula en donde el Si sería capaz de soportar el cambio de volumen sin sufrir fragmentación (Huggins y Nix, 2000), por lo que se han propuesto diversas geometrías y tamaños para estructurar el Si de manera que pueda ser utilizado como electrodo en baterías (Quiroga-González et al., 2013).

Una desventaja de disminuir el tamaño de las partículas de Si para su utilización en baterías es que durante la expansión volumétrica algunas

partículas se unen formando bloques densos que no contribuyen al almacenamiento de energía, por lo que la interacción entre partículas debe ser evitado (Dimov et al., 2003). Una solución es cubrir la superficie con una capa que sea iónica y electrónicamente conductiva; en este sentido, los materiales carbonosos poseen velocidades de transporte de iones y electrones elevada (Shen et al., 2018). En un sistema Si/C, el Si actúa como material activo almacenando gran cantidad de Li mientras que la matriz de C puede amortiguar la expansión de volumen del Si, además de mejorar la conductividad electrónica (Terranova et al., 2014). Por tanto, acoplando Si de baja dimensión con C se mejora la estabilidad durante el ciclado debido a que la expansión de volumen es amortiguada, además de que se minimiza la fractura y reformación de una capa de electrolito sólido (SEI). Hasta el momento son pocas las compañías que utilizan solo Si o Si/C en sus ánodos, ya que aún no han resuelto por completo su problemática relacionada con el cambio de volumen y de conductividad observado durante los ciclos de carga/descarga, a pesar de los diferentes esfuerzos que se están realizando a nivel internacional (Espinosa-Villatoro et al., 2021). Sin embargo, ya es común observar que estos materiales se usen como aditivo de ánodos de grafito, extendiendo su capacidad más allá de los 400 mAh/g.

## Baterías metal-aire

### Batería de zinc-aire

La batería zinc-aire (Zn-aire) fue descubierta a principios del siglo XIX y comercializada por primera vez en 1930 (Li y Dai, 2014). Sin embargo, en 1970 fue cuando salió al mercado la batería Zn-aire con las características que actualmente tiene (Chen et al., 2018). Cuenta con las ventajas de proporcionar una alta densidad de energía a un bajo costo, estar fabricada con materiales de baja toxicidad y económicos, además de tener una baja tasa de autodescarga, siempre y cuando se almacene bajo las condiciones adecuadas. Por otro lado, dentro de sus desventajas se en-

cuentra la sensibilidad a la humedad y reducción de la conductividad por la formación de carbonatos.

Existen baterías Zn-aire no recargables y recargables. Las primeras pueden ser empleadas en aplicaciones en las que la demanda de carga es continua y de baja potencia, por ejemplo, en el área médica, en telecomunicaciones, en señalización vial y en instrumentos de ayuda a la navegación. Las baterías Zn-aire recargables surgen como una opción para emplear en vehículos eléctricos ya que son mucho más económicas que las baterías de ion litio (LIB) (Li y Dai, 2014). Algunas de las compañías que fabrican baterías de Zn-aire no recargables son Energizer y Cegasa, mientras que Zinc8 Energy Solutions Inc. fabrica baterías Zn-aire recargables y NantEnergy produce ambos tipos (Bussewitz, 2018). El costo de las baterías de zinc-aire es de aproximadamente \$150 USD/kWh, pero para una opción más generalizada, el precio está por debajo de \$100 USD/kWh.

La batería Zn-aire está caracterizada por el acoplamiento de zinc metálico como electrodo negativo y un electrodo positivo que respira oxígeno continuo e inagotable del aire circundante. Este electrodo puede estar hecho de carbón poroso, carbón activado o nanotubos de carbono, además de un catalizador basado en un óxido metálico. Por otro lado, el aire, al no ser almacenado en el cuerpo de la batería, la hace más ligera y aumenta su capacidad específica de almacenamiento y energía por unidad de masa o volumen. El electrolito es de naturaleza alcalina, por ejemplo hidróxido de potasio, hidróxido de sodio o hidróxido de litio.

La implementación de un sistema electroquímico recargable en este tipo de baterías requiere del desarrollo y mejora de sus componentes. Tal es el caso del catalizador, en donde se requiere que sea bifuncional, es decir, que promueva la reacción de reducción de oxígeno (ORR) durante la descarga y la reacción de evolución de oxígeno (OER) durante la carga.

Además del catalizador bifuncional, para que una batería Zn-aire sea recargable es necesario que haya una regeneración del Zn, que puede darse de manera eléctrica, mecánica o hidráulica (Zhang, 2009), siendo

la regeneración eléctrica la de mayor potencial ya que no requiere de sistemas adicionales externos. El procedimiento de regeneración eléctrica consiste en la formación de zinc metálico a partir de óxido de zinc (ZnO) producido durante la descarga (ver Ecuación 2) y el oxígeno se oxida para producir oxígeno en una reacción OER.

El potencial estándar de las baterías Zinc-aire es de 1.65 V, aunque en la práctica sus voltajes de trabajo son más bajos, generalmente menores a 1.2 V para obtener densidades de corriente de descarga considerables. Para baterías recargables, las reacciones electroquímicas no se pueden revertir hasta alcanzar un voltaje de carga de 2.0 V, que ocasiona que tengan una eficiencia energética <60 % (Li y Dai, 2014). La densidad energética, incluyendo el oxígeno, es de 1 086 Wh/kg (Li y Dai, 2014) o 1 400 Wh/L (Chen et al., 2018).

### **Baterías de Li-aire**

El concepto de batería de Li-aire fue introducido por primera vez en 1996 (Abraham y Jiang, 1996). Este tipo de baterías consiste en un ánodo de Li y un cátodo poroso. Durante la descarga Li se oxida en  $\text{Li}^+$  y el oxígeno del aire se reduce en peróxido o anión de óxido, el cual combinado con los iones de  $\text{Li}^+$  del electrolito forma  $\text{Li}_2\text{O}_2$  y  $\text{Li}_2\text{O}$ . Los poros en el cátodo sirven como canales difusores de gas que permiten el flujo libre del oxígeno, acomodando sus productos insolubles (Zhang y Zhang, 2015).

Este tipo de baterías presenta diversas ventajas, por ejemplo, su energía específica (Skyllas-Kazacos et al., 2013) y el hecho de ser amigables con el medioambiente. No obstante, presentan algunas desventajas, entre ellas que dependen en gran medida de las condiciones ambientales, por ejemplo, de la presión atmosférica. Por último, no solo la reacción en el cátodo entrega la mayor parte de energía, sino que sufre de decaimiento de voltaje (Kraytsberg y Ein-Eli, 2011).

En la actualidad diversos grupos se encuentran realizando pruebas a distintos materiales para poder sobreponer los problemas previamente mencionados, tal es el caso de MikroMasch, que realiza estudios con el propósito de entregar las primeras baterías comerciales de Li-aire. Por otro lado, R&D Systems se ha interesado en su utilización como posible fuente de energía para vehículos eléctricos (Yamamoto, 2014).

## Conclusiones

---

Hay una vasta variedad de baterías recargables en el mercado, con propiedades varias. Algunas nos ofrecen alta potencia instantánea, alta capacidad específica, un alto voltaje o un voltaje estable, y otras son simplemente muy económicas. No hay una solución única de almacenamiento para atender ciertas necesidades; sin embargo, sí hay soluciones óptimas. En este capítulo se ha presentado una paleta de tipos de baterías, que puede ayudar a la toma de decisiones a la hora de diseñar y desarrollar sistemas energéticos sustentables. Esto es uno de los ejes principales dentro de la Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible, misma que se denota en el presente libro. No puede haber un sistema energético completamente sustentable sin almacenamiento de energía, ya que este posibilita el uso de fuentes de energía renovable (intermitentes) y apoya en maximizar la eficiencia, además de impactar en el desarrollo económico, y permite sostener la sociedad tecnologizada actual (como base de la movilidad eléctrica y dispositivos electrónicos móviles). Se puede decir que el almacenamiento de energía es parte fundamental del eje de sustentabilidad energética, pero impacta de forma directa en los ejes de medioambiente y sociedad.

## **AGRADECIMIENTOS**

*Los autores agradecen a Conahcyt por su apoyo económico a través del proyecto grupal de Ciencia de Frontera 21077 y el proyecto Pronaces 316537. De la misma forma, se agradece el apoyo de VIEP-BUAP a través del proyecto 00185-VIEP2023.*

## REFERENCIAS

- Abraham, K. M., y Jiang, Z. (1996). A polymer electrolyte-based rechargeable lithium/oxygen battery. *Journal of the Electrochemical Society*, 143(1), 1-5. <https://doi.org/10.1149/1.1836378>
- Beard, K. W., y Reddy, T. B. (2019). *Linden's handbook of batteries*. McGraw-Hill Education.
- Bensalah, N., y Dawood, H. (2016). Review on synthesis, characterizations, and electrochemical properties of cathode materials for lithium ion batteries. *Journal of Material Science & Engineering*, 5(4), 258. <https://doi.org/10.4172/2169-0022.1000258>
- Bukhari, S. M. A. S., Maqsood, J., Baig, M. Q., Ashraf, S., y Khan, T. A. (2015). *Comparison of characteristics - lead acid, nickel based, lead crystal and lithium based batteries* [Conference session]. 2015 17th UKSim-AMSS International Conference on Modelling and Simulation (UKSim), Cambridge, UK, 444-450. <https://doi.org/10.1109/UKSIM.2015.69>
- Bussewitz, C. (2018, 26 de septiembre). *Zinc-air batteries provide power in remote areas*. Phys Org. <https://phys.org/news/2018-09-zinc-air-batteries-power-remote-areas.html>
- Chen, J., Zhu, L., Jia, D., Jiang, X., Wu, Y., Hao, Q., Xia, X., Ouyang, Y., Peng, L., y Tang, W. (2019).  $\text{LiNi}_{0.8}\text{Co}_{0.15}\text{Al}_{0.05}\text{O}_2$  cathodes exhibiting improved capacity retention and thermal stability due to a lithium iron phosphate coating. *Electrochimica Acta*, 312, 179-187. <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2019.04.153>
- Chen, X., Zhou, Z., Karahan, H. E., Shao, Q., Wei, L., y Chen, Y. (2018). Recent advances in materials and design of electrochemically rechargeable zinc-air batteries. *Nano Micro Small*, 14(44).

- Chikkannanavar, S. B., Bernardi, D. M., y Liu, L. (2014). A review of blended cathode materials for use in Li-ion batteries. *Journal of Power Sources*, 248, 91-100. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jpowsour.2013.09.052>
- Danuta, H., y Juliusz, U. (1962). *Electric dry cells and storage batteries*. (U.S. Patent No. US3043896A). <https://patents.google.com/patent/US3043896A/en>
- Dimov, N., Kugino, S., y Yoshio, M. (2003). Carbon-coated silicon as anode material for lithium ion batteries: advantages and limitations. *Electrochimica Acta*, 48(11), 1579-1587. [https://doi.org/10.1016/S0013-4686\(03\)00030-6](https://doi.org/10.1016/S0013-4686(03)00030-6)
- Espinosa-Villatoro, E., Nelson-Weker, J., Ko, J. S., y Quiroga-González, E. (2021). Tracking the evolution of processes occurring in silicon anodes in lithium ion batteries by 3D visualization of relaxation times. *Journal of Electroanalytical Chemistry*, 892, 115309. <https://doi.org/10.1016/j.jelechem.2021.115309>
- Fetcenko, M. A., Ovshinsky, S. R., Reichman, B., Young, K., Fierro, C., Koch, J., Zallen, A., Mays, W., y Ouchi, T. (2007). Recent advances in NiMH battery technology. *Journal of Power Sources*, 165(2), 544-551. <https://doi.org/10.1016/J.JPOW-SOUR.2006.10.036>
- Garay-Marín, J. D., Quiroga-González, E., Garza-Tovar, L. L., Reuter, F., Kensy, C., Althues, H., y Kaskel, S. (2021). High-performing Li-ion battery with “two cathodes in one” of sulfur and LiFePO<sub>4</sub> by strategies of mitigation of polysulfide shuttling. *Batteries & Supercaps*, 4, 359-367. <https://doi.org/10.1002/batt.202000238>
- Hioki. (2020). *Lead-acid battery handbook. User's guide*. Hioki E. E. Corporation.
- Huggins, R. A., y Nix, W. D. (2000). Decrepiation model for capacity loss during cycling of alloys in rechargeable electrochemical systems. *Ionics*, 6(1-2), 57-63. <https://doi.org/10.1007/BF02375547>
- Dean, J. A. (1985). *Lange's handbook of chemistry*. McGraw-Hill.
- Keshan, H., Thornburg, J., y Ustun, T. S. (2016). *Comparison of lead-acid and lithium ion batteries for stationary storage in off-grid energy systems* [Conference session]. 4th IET Clean Energy and Technology Conference, Kuala Lumpur, Malaysia, 1-7. <https://doi.org/10.1049/cp.2016.1287>

- Kraytsberg, A., y Ein-Eli, Y. (2011). Review on Li-air batteries - Opportunities, limitations and perspective. *Journal of Power Sources*, 196(3), 886-893. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2010.09.031>
- Li, Y., y Dai, H. (2014). Recent advances in zinc-air batteries. *Chemical Society Reviews*, 43, 5257. <https://doi.org/10.1039/C4CS00015C>
- Liang, B., Liu, Y., y Xu, Y. (2014). Silicon-based materials as high capacity anodes for next generation lithium ion batteries. *Journal of Power Sources*, 267, 469-490. <https://doi.org/10.1016/J.JPOWSOUR.2014.05.096>
- Liang, Y., Zhao, C. Z., Yuan, H., Chen, Y., Zhang, W., Huang, J. Q., Yu, D., Liu, Y., Titirici, M. M., Chueh, Y. L., Yu, H., y Zhang, Q. (2019). A review of rechargeable batteries for portable electronic devices. *InfoMat*, 1(1), 6-32. <https://doi.org/10.1002/INF2.12000>
- Lin, J., Zhang, X., Cai, L., Fan, E., Wu, S., Ma, S., Wu, F., Chen, R., y Li, L. (2022). Recycling of rechargeable batteries: Insights from a bibliometrics-based analysis of emerging publishing and research trends. *Advanced Energy and Sustainability Research*, 3(2), 2100153. <https://doi.org/10.1002/aesr.202100153>
- Lopes, P. P., y Stamenkovic, V. R. (2020). Past, present, and future of lead-acid batteries. *Science*, 369(6506), 923-924. <https://doi.org/10.1126/science.abd3352>
- Manthiram, A., y Goodenough, J. B. (2021). Layered lithium cobalt oxide cathodes. *Nature Energy*, 6(3), 323-323. <https://doi.org/10.1038/s41560-020-00764-8>
- Manthiram, A., Song, B., y Li, W. (2017). A perspective on nickel-rich layered oxide cathodes for lithium-ion batteries. *Energy Storage Materials*, 6, 125-139. <https://doi.org/10.1016/j.ensm.2016.10.007>
- Mordor Intelligence. (2023, 30 de septiembre). *Mercado de baterías de plomo-ácido: crecimiento, tendencias, impacto de COVID-19 y pronósticos*. <https://www.mordorintelligence.com/es/industry-reports/lead-acid-battery-market#:~:text=%C2%BFQui%C3%A9nes%20son%20los%20principales%20fabricantes,de%20bater%C3%ADas%20de%20plomo%2D%C3%A1cido>

- Nitta, N., Wu, F., Tae Lee, J., y Yushin, G. (2015). Li-ion battery materials: present and future. *Materials Today*, 18(5), 252-264. <https://doi.org/10.1016/j.mat-tod.2014.10.040>
- Peramunage, D., y Licht, S. (1993). A solid sulfur cathode for aqueous batteries. *Science*, 261(5124), 1029-1032. <https://doi.org/10.1126/science.261.5124.1029>
- Quiroga-González, E., Ossei-Wusu, E., Carstensen, J., y Föll, H. (2011). How to make optimized arrays of Si wires suitable as superior anode for li-ion batteries. *Journal of Electrochemical Society*, 158(11), E119-E123. <https://doi.org/10.1149/2.069111jes>
- Quiroga-González, E., Carstensen, J., y Föll, H. (2013). Optimal conditions for fast charging and long cycling stability of silicon microwire anodes for lithium ion batteries, and comparison with the performance of other Si anode concepts. *Energies*, 6(10), 5145-5156. <https://doi.org/10.3390/en6105145>
- Rao, B. M. L., y Shropshire, J. A. (1981). Effect of sulfur impurities on Li /  $\text{TiS}_2$  cells. *Journal of the Electrochemical Society*, 128(5), 942-945. <https://doi.org/10.1149/1.2127579>
- Rauh, R. D., Shuker, F. S., Marston, J. M., y Brummer, S. B. (1977). Formation of lithium polysulfides in aprotic media. *Journal of Inorganic and Nuclear Chemistry*, 39(10), 1761-1766. [https://doi.org/10.1016/0022-1902\(77\)80198-X](https://doi.org/10.1016/0022-1902(77)80198-X)
- Satyavani T., Srinivas Kumar A., y Subba, P. (2016). Methods of synthesis and performance improvement of lithium iron phosphate for high rate Li-ion batteries: A review. *Engineering Science and Technology, an International Journal*, 19(1), 178-188. <https://doi.org/10.1016/j.jestch.2015.06.002>
- Shen, X., Tian, Z., Fan, R., Shao, L., Zhang, D., Cao, G., Kou, L., y Bai, Y. (2018). Research progress on silicon/carbon composite anode materials for lithium-ion battery. *Journal of Energy Chemistry*, 27(4), 1067-1090. <https://doi.org/10.1016/j.jechem.2017.12.012>
- Shukla, A. K., Venugopalan, S., y Hariprakash, B. (2001). Nickel-based rechargeable batteries. *Journal of Power Sources*, 100(1-2), 125-148. [https://doi.org/10.1016/S0378-7753\(01\)00890-4](https://doi.org/10.1016/S0378-7753(01)00890-4)

- Skyllas-Kazacos, M., Menictas, C., y Lim, T. (2013). Redox flow batteries for medium-to large-scale energy storage. *Electricity Transmission, Distribution and Storage Systems*, 398-441. <https://doi.org/10.1533/9780857097378.3.398>
- Terranova, M. L., Orlanducci, S., Tamburri, E., Guglielmotti, V., y Rossi, M. (2014). Si/C hybrid nanostructures for Li-ion anodes: An overview. *Journal of Power Sources*, 246, 167-177. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2013.07.065>
- Yamamoto, O. (2014). Introduction. En N. Imanishi, A. Luntz y P. Bruce (Eds.), *The Lithium Air Battery: Fundamentals* (pp. 1-21). Springer New York. [https://doi.org/10.1007/978-1-4899-8062-5\\_1](https://doi.org/10.1007/978-1-4899-8062-5_1)
- Yartys, V., Noreus, D., y Latroche, M. (2016). Metal hydrides as negative electrode materials for Ni-MH batteries. *Applied Physics A*, 122(1), 1-11. <https://doi.org/10.1007/s00339-015-9538-9>
- Young, K. H. (2016a). Electrochemical applications of metal hydrides. *Compendium of Hydrogen Energy*, 289-304. <https://doi.org/10.1016/B978-1-78242-363-8.00011-6>
- Young, K. H. (2016b). Research in nickel/metal hydride batteries 2016. *Batteries*, 2(4), 31. <https://doi.org/10.3390/batteries2040031>
- Young, K. H. (2018). Research in nickel/metal hydride batteries 2017. *Batteries*, 4(1), 9. <https://doi.org/10.3390/BATTERIES4010009>
- Zeng, X., Li, M., Abd El-Hady, D., Alshitari, W., Al-Bogami, A. S., Lu, J., y Amine, K. (2019). Commercialization of lithium battery technologies for electric vehicles. *Advanced Energy Materials*, 9(27), 1900161. <https://doi.org/10.1002/aenm.201900161>
- Zhang, H., Li, X., y Zhang, H. (2017). *Li-S and Li-O<sub>2</sub> Batteries with High Specific Energy*. Springer. <https://doi.org/10.1007/978-981-10-0746-0>
- Zhang, S. S., y Zhang, Z. (2015). Oxygen redox catalyst for rechargeable lithium-air. En Z. Zhang y S. Zhang (Eds.), *Rechargeable Batteries. Green Energy and Technology* (pp. 541-557). Springer, Cham. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-15458-9\\_19](https://doi.org/10.1007/978-3-319-15458-9_19)

- Zhang, X. (2009). Zinc electrodes: Overview. En J. Garche (Ed.), *Encyclopedia of Electrochemical Power Sources* (pp. 454-468). Elsevier.
- Zhao, H. (2015). Lithium titanate-based anode materials. En Z. Zhang y S. Zhang (Eds.), *Rechargeable Batteries. Green Energy and Technology* (pp. 157-187). Springer, Cham. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-15458-9\\_6](https://doi.org/10.1007/978-3-319-15458-9_6)
- Zhao, Z., Walia, G. K., Li, G., y Tang, T. (2022). Recycling battery metallic materials. Nano technology for battery recycling. *Remanufacturing, and Reusing*, 321-347. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-91134-4.00007-8>
- Zhou, D., Guo, X., Zhang, Q., Shi, Y., Zhang, H., Yu, C., Pang, H., Zhou, D., Guo, X., Zhang, Q., Shi, Y., Zhang, H., Pang, H., y Yu, C. (2022). Nickel-based materials for advanced rechargeable batteries. *Advanced Functional Materials*, 32(12), 2107928. <https://doi.org/10.1002/ADFM.202107928>
- Zubi, G., Dufo-López, R., Carvalho, M., y Pasaoglu, G. (2018). The lithium-ion battery: State of the art and future perspectives. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 89, 292-308. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.03.002>

# CAPÍTULO 5.

## IMPORTANCIA SOCIOAMBIENTAL DE LA BIOMASA FORESTAL EN COMUNIDADES RURALES: EJIDO LA REFORMA, MUNICIPIO DE PALENQUE, CHIAPAS

**Julio César López Reyes,<sup>1</sup> Pascual López de Paz,<sup>2</sup> Marcelino García Benítez<sup>3\*</sup>**

<sup>1,2</sup> Instituto de Investigación e Innovación en Energías Renovables (IIER), Universidad de Ciencias y Artes de Chiapas. Tuxtla Gutiérrez, Chiapas, México, 29035. julio.lopez@edu.unicach.mx y pascual.lopez@unicach.mx

<sup>3</sup> Instituto de Investigación en Gestión de Riesgos y Cambio Climático (IIGERCC). Universidad de Ciencias y Artes de Chiapas. Tuxtla Gutiérrez, Chiapas, México, 29035.

\*marcelino.garcia@unicach.mx

### Resumen

**M**éxico cuenta con una amplia variedad de recursos naturales que pueden ser aprovechados para la generación de energías renovables. El estado de Chiapas, ubicado en el sureste mexicano, presenta un índice de marginación y de pobreza muy alto; se estima que 89 % de las viviendas de comunidades rurales utilizan leña como combustible para la cocción de alimentos y para calentar agua. El objetivo principal de este trabajo es describir las características ambientales, sociales y económicas de la población del ejido La Reforma del municipio de Palenque, Chiapas, con la finalidad de conocer sus necesidades energéticas

mediante la estimación de las propiedades físicas, químicas y energéticas de especies nativas usadas como leña. Los resultados han permitido conocer los porcentajes de humedad, materia volátil y ceniza, así como el poder calorífico de las especies de leña disponibles en la comunidad y finalmente calcular el potencial energético de la biomasa forestal. Con el manejo adecuado y un cambio de cultura de las comunidades rurales, la biomasa forestal puede ser una solución sustentable de las necesidades energéticas para la cocción de alimentos, calentar agua para bañarse, así como atemperar las viviendas que se encuentran en comunidades con clima frío.

Palabras clave: **Comunidades rurales; biomasa forestal; necesidades energéticas; potencial energético.**

### **Abstract**

Mexico has a wide variety of natural resources that can be used to generate renewable energy. The state of Chiapas, located in the southeast of Mexico, has a very high marginalization and poverty index; it is estimated that 89 % of the homes in rural communities use firewood as fuel for cooking food and heating water. The main objective of this work is to describe the environmental, social, and economic characteristics of the population of the La Reforma ejido of the municipality of Palenque, Chiapas, to know their energy needs by estimating the physical, chemical, and energetic properties of species natives used as firewood. The results have allowed us to see the percentage of humidity, the rate of volatile matter, the percentage of ash, and the calorific value of the firewood species available in the community. Finally, we have calculated the energy potential of the forest biomass. With proper management and a change in the culture of rural communities, forest biomass can be a sustainable solution to the energy needs for cooking food, heating water for bathing, and cooling homes found in communities with cold climates.

Keywords: **Rural communities; forest biomass; energy needs; energy potential.**

## Introducción

México es uno de los países con enorme potencial de recursos naturales y minerales. Más de 50 por ciento del territorio está compuesto por poblados rurales, que son importantes fuentes por la cantidad de recursos naturales y minerales que pueden ser utilizados como medios alternativos de empleo e ingresos para su población. Las zonas rurales tienen un gran potencial como fuentes de energía renovable, una alternativa pueden ser los biocombustibles producidos a partir de productos agrícolas o derivados de la ganadería (OCDE, 2007).

Para el Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), las localidades rurales son aquellas que tienen una población menor a 2 500 habitantes (INEGI, 2020). La Organización para la Cooperación y Desarrollo Económico (OCDE) considera el criterio de comunidad rural si su densidad poblacional es menor a 150 habitantes por km<sup>2</sup> (OCDE, 2007).

Un estudio realizado por Ghilardi et al. (2007) utilizó la metodología WISDOM, la cual partió de una perspectiva nacional analizando 2 395 municipios (de un total de 2 424, con información del año 2000) e identificó 304 municipios críticos, distribuidos en 16 áreas prioritarias donde se usa la leña como fuente de energía. De esos municipios prioritarios que abarcan una superficie de 7 617 048 hectáreas, el estado de Chiapas comprende 19 con una extensión de 1 193 200 hectáreas, el estado de Guerrero tiene 16 que conforman una superficie de 1 121 196 hectáreas y el estado de Oaxaca presenta 72 municipios con una superficie de 745 744 hectáreas. Estos resultados muestran que es urgente realizar acciones para usar adecuadamente la leña, de lo contrario se convertirá en un problema socioambiental.

La leña como combustible es una fuente de energía que se utiliza en todo el país, sin embargo, la mayor cantidad de personas que dependen de la leña como mecanismo de consumo energético básico se presenta en regiones del centro y sur de México. Se asocia con las condiciones de

marginación, pobreza económica y/o patrimonio, así como de carencias en los grupos con menores oportunidades y cohesión social.

Los tipos de biomasa o bioenergía que se utilizan en el país son: lodos de depuradora, residuos agrícolas, residuos industriales, residuos sólidos urbanos y bagazo de caña, entre otros. El 18.97 % de la electricidad producida por biomasa proviene de la producción de biogás y bagazo de caña. Durante el año 2021 la electricidad generada a partir de la biomasa proveniente del sector privado tuvo una generación de energía de 14 544.03 GWh (Sener, 2022).

Si el uso de leña para la cocción de alimentos trae consigo enfermedades en las vías respiratorias de las amas de casa y provoca deforestación en los bosques aledaños de las comunidades rurales, entonces se puede utilizar biomasa forestal que tenga un excelente poder calorífico y presente un mínimo porcentaje de ceniza, aunado a una cultura de reforestación por parte de sus pobladores.

## **El desarrollo sustentable en las comunidades rurales**

---

La leña es la biomasa más utilizada en el mundo. Su uso para cocinar o calentar es muy común, especialmente en los países subdesarrollados, donde se quema en cocinas abiertas y poco eficientes y las habitaciones están mal ventiladas. Los principales compuestos de la quema de madera son el monóxido de carbono, el dióxido de nitrógeno y las partículas, los cuales son tóxicos para el sistema respiratorio (Junemann y Legarreta, 2007; Langbein, 2017).

Debido a la creciente conciencia sobre el estado de degradación ambiental en el mundo, se ha promovido el proceso de cambio del pensamiento global y la forma de interacción entre la sociedad y la naturaleza, ahora basados en el conocimiento o el análisis interdisciplinario de complejos problemas socioambientales. Desde entonces, varios tratados inter-

nacionales han promovido el establecimiento del concepto de desarrollo sostenible y/o sustentable (López, 2020; Perevochtchikova, 2013).

La Comisión Mundial sobre el Medio Ambiente y el Desarrollo (CMMAD, 1987) define el impacto ambiental como el resultado de las actividades humanas sobre el medioambiente y los procesos naturales en un espacio y tiempo específicos. De esta manera, se puede decir que los impactos ambientales son los efectos adversos de las actividades humanas en el ecosistema, el clima en la sociedad, la sobreexplotación de los recursos naturales, la eliminación ineficaz de desechos, eliminación de emisiones o contaminantes y cambios en el uso del suelo, entre otros.

Organismos internacionales como la Organización de las Naciones Unidas (ONU) han propuesto que el modelo del desarrollo económico tiene que procurar la equidad social y proteger el medioambiente. Es así como surge en 1987 la teoría de la sustentabilidad, que propone un desarrollo universal sustentable. El desarrollo sustentable fue definido en el seno de la Comisión Mundial sobre el Medio Ambiente y el Desarrollo, específicamente propuesto por Gro Harlem Brundtland en 1987 en el informe “Nuestro futuro común”, el cual se define como “el desarrollo que satisface las necesidades del presente sin comprometer la capacidad de las generaciones futuras para satisfacer sus propias necesidades” (CMMAD, 1987, p. 24).

En la cumbre de Río de Janeiro de 1992 se adoptó un plan de acción global, la Agenda 21, que establecía una estrategia en la que los países adquirirían el compromiso de encaminar su desarrollo con iniciativas para un modelo de desarrollo sustentable. Dentro de sus objetivos se encontraba la elaboración de indicadores de desarrollo sostenible, así como la promoción de su uso a nivel mundial (López, 2020; IAEA, 2007).

Los esfuerzos mundiales continuaron en la Cumbre del Milenio de las Naciones Unidas celebrada en el año 2000, en la que se declaró que el reto central era forjar la globalización como una fuerza positiva para que todos realicen un llamado a las políticas y medidas globales correspon-

dientes a los requerimientos de los países menos desarrollados y de las economías en evolución. Además, los líderes mundiales comprometieron a sus naciones a una nueva asociación internacional para reducir la pobreza extrema y establecieron metas para el 2015, mejor conocidas como los Objetivos de Desarrollo del Milenio (ODM), como erradicar la pobreza extrema y el hambre, garantizar la sostenibilidad del medioambiente y fomentar una alianza mundial para el desarrollo.

En seguimiento a los resultados de la Cumbre del Milenio, la Asamblea General de las Naciones Unidas aprobó en octubre de 2015 la Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible, un plan de acción a favor de las personas, el planeta y la prosperidad que declara los 17 Objetivos de Desarrollo Sostenible y 169 metas voluntarias, con lo que se pretende retomar los ODM. Los objetivos y metas de la Agenda 2030, en vigor desde el 1 de enero de 2016, fusionan las tres dimensiones del desarrollo sustentable: ambiental, social y económica, que guiarán las decisiones durante los próximos 15 años (ONU, 2017).

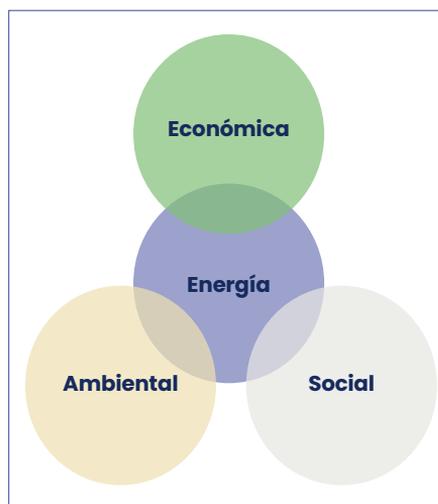
El desarrollo sustentable es una empresa multidimensional para lograr una mejor calidad de vida para todas las poblaciones; el desarrollo económico, el desarrollo social y la protección del medioambiente son componentes interdependientes que se refuerzan mutuamente del desarrollo sustentable (Ayala, 2018). Las dimensiones que integran la sustentabilidad son tres: la ambiental, la social y la económica. Esta última toma en cuenta el capital natural que compone todos los recursos naturales, los servicios ambientales del planeta, como los suelos y las funciones atmosféricas. La conservación del capital natural es esencial para la producción económica sostenible y la equidad entre generaciones; los mecanismos del mercado no necesariamente son efectivos para conservar el capital natural, por el contrario, podrían contribuir a reducirlo y degradarlo. Asimismo, la dimensión económica debe tomar en cuenta que el crecimiento económico es un medio y no un fin para alcanzar sociedades libres, igualitarias, respetuosas de la vida y capaces de fomentar la generación de empleos dignos y de calidad (García-Hernández, 2016).

La equidad y la salud componen la dimensión social del desarrollo sustentable. Abarca la igualdad y la universalidad con las que los recursos energéticos son distribuidos, mientras que para garantizar la asequibilidad se requiere acceso a los sistemas de energía, aunado a que se establezcan regímenes para que los precios sean factibles, de manera que se encuentren al alcance de todos. La dimensión ambiental procura reducir el impacto ambiental y hace más eficientes los sistemas, lo que permite ahorros energéticos y el desarrollo de ofertas de energías renovables y de otras fuentes bajas en carbono (Harris, 2003; Insah y Subhes, 2015).

El acceso a la energía tiene una repercusión directa sobre la calidad de vida de las personas, la educación, las oportunidades de empleo, la transición demográfica, etc. En muchos lugares un interruptor permite el uso de iluminación, la preparación de alimentos y la calefacción, mientras que en otros casos se requieren varias horas para la recolección de leña destinada para la cocción de alimentos y calefacción (Ayala, 2018). En la Figura 1 se describe la relación tan estrecha de la energía con las dimensiones del desarrollo sustentable. La dimensión ambiental tiene el principal objetivo de reducir el impacto desfavorable del uso de la energía sobre el medioambiente; los daños son tales que contribuyen considerablemente en el cambio climático existente.

Debido al cambio climático global originado por las actividades antropogénicas y la quema de combustibles fósiles, se ha presentado un

**FIGURA 1.** *Relación de la energía y el desarrollo sustentable*



Fuente: Elaboración propia.

incremento en la temperatura de la atmósfera y de los océanos, lo que trae consigo el derretimiento del hielo polar y un incremento en el nivel de los mares.

Las empresas dedicadas a la generación de energía buscan principalmente que el suministro de energía sea rentable y asequible y toma en cuenta la efectividad de los costos para asegurar que la inversión sea económicamente viable. Sin embargo, la asequibilidad no solo asegura la disponibilidad de la energía, sino que también sea accesible a la sociedad.

## **Biomasa como energía renovable**

La energía es el motor para el desarrollo económico de la sociedad. En la actualidad se presenta una creciente demanda poblacional que aunada al modelo económico capitalista han propiciado que las actividades relacionadas con la generación de energía presenten impactos ambientales negativos (García-Benítez, 2021).

De acuerdo con Carta et al. (2009), la energía de biomasa es almacenada en los seres vivos, vegetales o animales por medio del proceso de fotosíntesis y la digestión de estos vegetales por los animales; es un pequeño porcentaje de la energía solar que llega a la Tierra. En la práctica pueden suponerse tres fuentes de energía de la biomasa: de origen vegetal (biomasa natural, cultivos energéticos), de origen animal (excrementos y purines) y de origen humano (excrementos y purines).

Prehn y Cumana (2010) definen la bioenergía como la energía obtenida de la biomasa; es toda materia viva derivada de seres vivos e incluye una gama muy amplia de materiales como madera, frutas, cereales, jugos y fibras. Estos materiales pueden ser obtenidos de cultivos de desechos sólidos o líquidos, entre otras fuentes. La energía útil se puede extraer directamente o posteriormente en carbón, biogás, bioetanol o biodiesel.

Cerca de 2 000 millones de personas en el mundo dependen de la biomasa para cocinar o para calefacción. En México el consumo de leña

representa el 10 % de la energía primaria y aporta el 46 % de la energía demandada por el sector residencial (Maserá, 1993). El 89 % de la población rural usa la leña como principal combustible para la cocción de sus alimentos y en las zonas urbanas los usuarios de leña constituyen el 11 % de la población (Díaz, 2000).

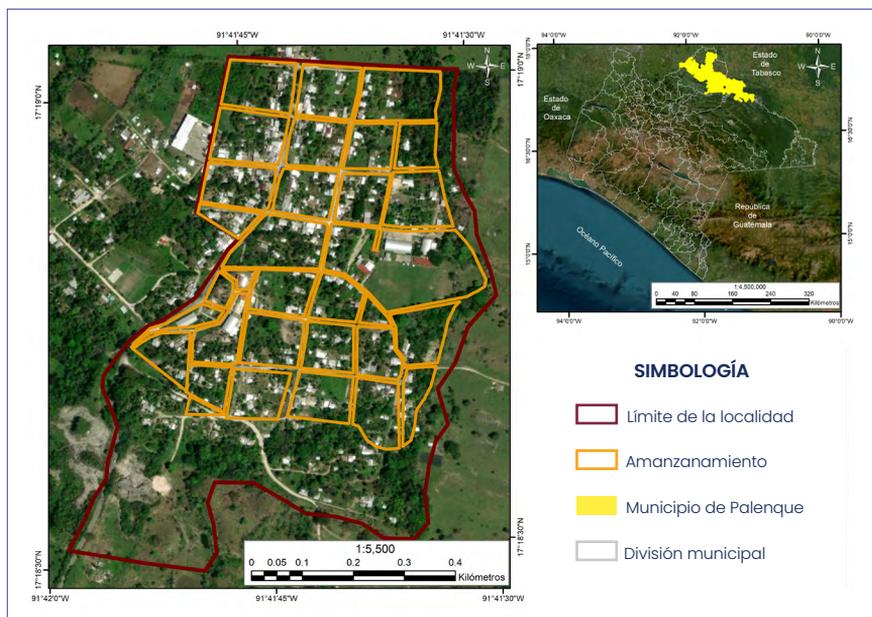
El consumo promedio de leña es de 2.1 kg/día/habitante o 4.6 toneladas/familia/año, que suma unos 30 millones de m<sup>3</sup>/año. Los niveles de contaminación intramuros en los hogares que utilizan leña para cocinar son muy altos (700 mg/m<sup>3</sup>), más de tres veces el promedio reportado en grandes ciudades, y los principales afectados por esta contaminación son mujeres y niños. Si bien el gas LP ha sido adoptado por muchas familias rurales, no sustituye a la leña, sino que la complementa. El uso de leña se concentra principalmente en los hogares rurales y en pequeñas industrias.

El desarrollo tecnológico y la adopción de insumos eficientes de leña es un proceso complejo que comprende aspectos sociales, culturales, económicos y tecnológicos. Entre los beneficios que una estufa brinda con respecto a fogones tradicionales se encuentran los siguientes: ahorro de leña, reducción en la contaminación de interiores generada por la quema de leña, condiciones de salud de los habitantes, y menor presión sobre las especies vegetales locales que pudieran ser utilizadas como recurso energético.

## Caracterización de la zona de estudio

El ejido La Reforma está ubicado en la parte norte del estado de Chiapas, en el municipio de Palenque, al cual se puede llegar por carretera, 33 kilómetros al noreste de donde se encuentra la ciudad de Palenque. La comunidad se localiza a 17°18'47.890'' de latitud Norte, 91°41'37.705'' de longitud Oeste y a 139 m sobre el nivel del mar (INEGI, 2020). (Ver Mapa 1).

**MAPA 1.** Ubicación del ejido La Reforma del municipio de Palenque, Chiapas



Fuente: Elaboración con base en INEGI (2020a).

De acuerdo con el Censo de Población y Vivienda 2020 del Instituto Nacional de Estadística y Geografía, el ejido La Reforma cuenta con 702 habitantes de los cuales 48 % son hombres y 52 % son mujeres que habitan en 176 viviendas particulares con servicios (INEGI, 2020). La localidad cuenta con servicio eléctrico suministrado por la Comisión Federal de Electricidad.

Con respecto de la situación social, en el rubro de educación en el ejido existe un jardín de niños, una escuela primaria y una telesecundaria. El promedio de escolaridad es de 7.85 grados, lo que significa que la población tiene un promedio de segundo grado de secundaria.

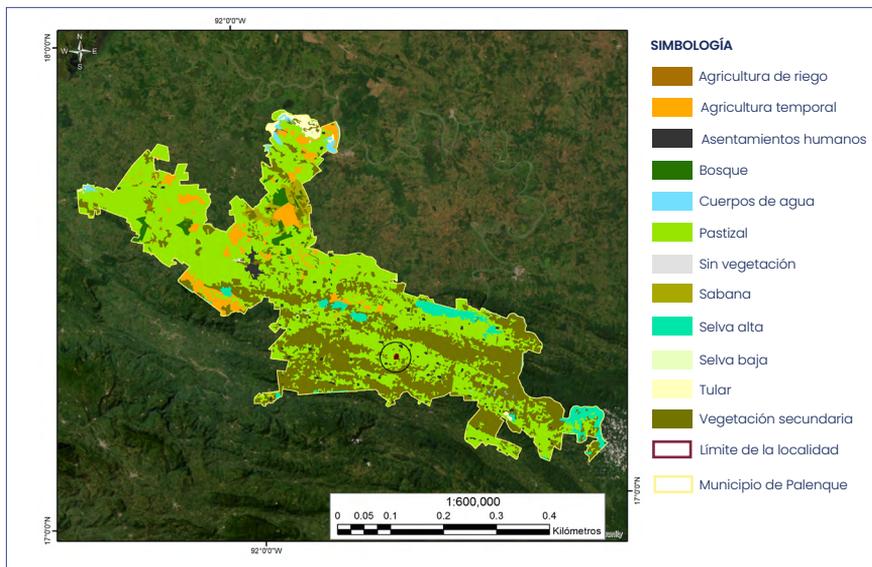
En el ejido La Reforma las principales actividades realizadas por la población son de tipo primarias. En el año 2020 se registró que de la población de 12 años y más, el 51 % se encontraba económicamente activa. Las

características ambientales implican tierras del ejido como pastizal natural, la vegetación arbórea está conformada por árboles de guanacaste, zapote, cocoite, guachi, guácima, popistle, garrochillo, palo de agua, palo blanco, cedro y tinto, entre otros; la vegetación secundaria la forman arbustos y hierbas. Con respecto al uso del suelo presenta agricultura de temporal constituida por cultivos de maíz, frijol, jitomate y chile (Mapa 2).

## Proceso metodológico

La metodología que se utilizó en este trabajo de investigación considera los criterios social, ambiental y económico del desarrollo sustentable. Con el objetivo de identificar las necesidades energéticas de la población se aplicó una encuesta a 23 de 176 viviendas particulares habitadas con servicios (VPHCS).

**MAPA 2.** *Uso del suelo y vegetación en el ejido La Reforma, municipio de Palenque, Chiapas*



Fuente: Elaboración propia con base en INEGI (2019).

Para el cálculo de la muestra se recurrió a la Ecuación 1, en la cual se define que la muestra se manejó en un nivel de confianza del 90 % y un porcentaje de error del 10 %; p y q representan los eventos probabilísticos de éxito y fracaso. Se consideró que 89 % de los hogares rurales utilizan leña para cocción de alimentos, por tanto,  $p = 0.89$  y  $q = 0.11$  (Díaz, 2000). De la distribución normal se considera un nivel de confianza de 90 %; tenemos que el valor para  $Z = 1.64$  y  $e = 0.1$ .

$$n = \frac{Z^2 pqN}{e^2(N-1)+Z^2 pq} \quad (1)$$

En la Tabla 1 se describen algunas de las respuestas de la denominada “Encuesta de necesidades energéticas”. Se utilizó el muestreo aleatorio simple para seleccionar las viviendas de una muestra de la población (Mapa 3).

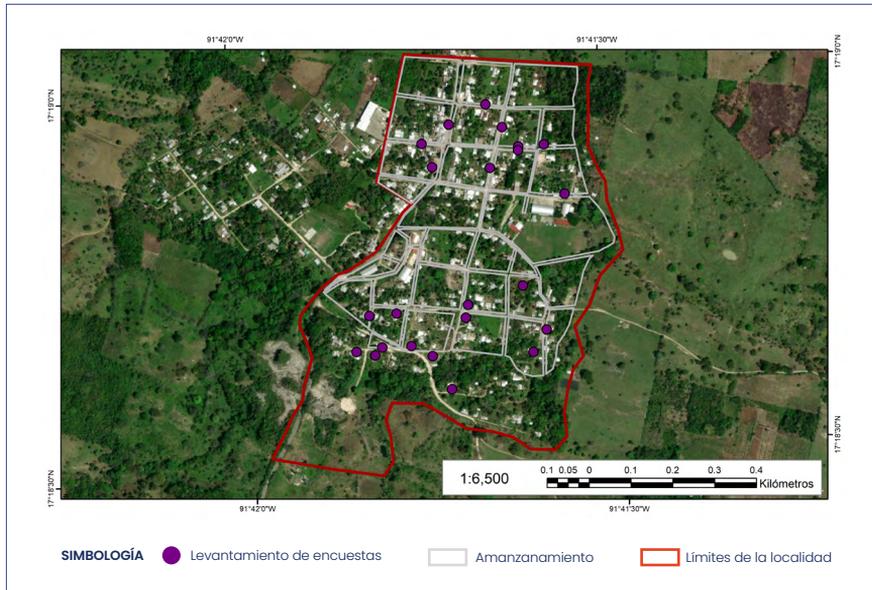
**TABLA 1.** Respuestas de la “Encuesta de necesidades energéticas”

Variable	Dato
Jefes de familia, hombres	20
Jefes de familia, mujeres	3
Promedio de edad del jefe de familia	55 años
Promedio de ocupantes por vivienda	4
Ingreso promedio mensual	\$4 674.00
Gasto en energía eléctrica (bimestral)	\$200.00
Gasto en gas LP (mensual)	\$320.00
Número de viviendas que cuentan con energía eléctrica	23
Número de viviendas con estufa de gas LP	14
Consumo promedio de leña por semana	61 kilogramos

Fuente: Elaboración propia.

Como segundo paso fueron entrevistados actores clave del ejido, entre ellos los integrantes del comisariado ejidal y del consejo de vigilancia. El objetivo fue identificar, de las especies de árboles que se utilizan para leña, por cuáles se inclinan los pobladores para la cocción de alimentos, así como el porcentaje de sus terrenos que destinan como reserva arbórea.

**MAPA 3.** Identificación de las viviendas encuestadas en la localidad La Reforma



Fuente: Elaboración propia.

## Cálculo del potencial total de la biomasa forestal

Para calcular el potencial total de la biomasa forestal que puede ser utilizada como combustible se debe conocer la densidad forestal de la especie de árbol, la densidad de la madera, el diámetro y el fuste. Esta información se obtuvo en campo, se seleccionó una hectárea de terreno para obtener la densidad forestal, se tomaron tres ejemplares de cada especie, se midió el diámetro y el fuste.

Esta información se confrontó con datos de fuentes oficiales como las bases de datos de la Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (Conabio), del Inventario Nacional Forestal y de Suelos de la Comisión Nacional Forestal (Conafor) y de la hoja de cálculo

de Clean Cooking Alliance (2022). Para calcular el potencial energético teórico de la biomasa (PET) se utilizó la Ecuación 2:

$$PET = \sum_{i=1}^n (df) \frac{(\pi)}{4} (D^2) (Fu) (dm) (PCS) (S) \quad (2)$$

PET = potencial energético teórico-total (KJ)	dm = densidad de la madera (kg/m <sup>3</sup> ) PCS = Poder calorífico superior (kJ/kg)
df = densidad forestal (número de árboles por hectárea)	S = superficie (Ha) n = número de especies de árboles
D = diámetro del árbol (m)	
Fu = fuste o longitud del tronco (m)	

Se recolectaron muestras de las cinco especies de árboles más utilizadas como leña, mismas que se llevaron al laboratorio para conocer sus propiedades físicas, químicas y energéticas. Se realizaron pruebas de humedad, porcentaje de materia volátil, porcentaje de cenizas y determinación del poder calorífico superior en el Laboratorio de Investigación y Evaluación en Bioenergía (Lineb) de la Universidad Nacional Autónoma de México.

## Resultados

Mediante el análisis del resultado de la “Encuesta de necesidades energéticas”, aplicada a las amas de casa y jefes de familia, se determinó que en relación a la cocción de alimentos y otras actividades del hogar es el gas y la leña lo que más se utiliza. Con las respuestas de la entrevista a las autoridades ejidales (actores clave) y considerando la experiencia de las amas de casa, se determinó que las especies de los árboles de guácima, palo blanco, palo de agua, popistle y garrochillo proporcionan una buena cocción a los alimentos y generan menos cantidades de humo (Tabla 2).

**TABLA 2.** Respuesta de la entrevista con actores clave

Persona entrevistada	% de la parcela	Distancia (km)	Leña
Presidente del comisariado ejidal	5 %	1.8	Guácima, palo blanco, palo de agua, garrochillo.
Secretario del comisariado ejidal	5 %	1.2	Guácima, popistle, palo de agua, palo blanco, garrochillo.
Tesorero del comisariado ejidal	5 %	2.6	Guácima, cocoite.
Presidente del consejo de vigilancia	5 %	5.6	Guácima, popistle.
Secretario del consejo de vigilancia	18 %	6.2	Guácima, zapote.
Tesorero del consejo de vigilancia	40 %	9.2	Guácima, tabaquillo.

Fuente: Elaboración propia.

En esta investigación es importante resaltar las especies de leña idóneas para la cocción de alimentos, aunado a que en la mayoría de las viviendas la cocina se encuentra al exterior, lo que conlleva menos afectaciones en la salud de las amas de casa y los niños.

De las cinco especies leñosas que prefieren las amas de casa del ejido La Reforma para uso como combustible para la cocción de alimentos se llegó a determinar que los árboles de popistle (*blepharidium guatemalense*) y palo blanco (*guarea glabra*) son idóneos para uso como leña. Se tomó en cuenta la abundancia de estas especies en el ejido La Reforma, tras un análisis químico y energético que se realizó en laboratorio. Las especies señaladas presentan un alto contenido en materia volátil (>80 %), bajo contenido de cenizas (<1.8 %) y excelente poder calorífico (>19 500 kJ/kg).

Con las pruebas de laboratorio (Tabla 3) se identificaron las características físicas, químicas y energéticas de las cinco especies más utilizadas, tales como los porcentajes de humedad, material volátil durante su combustión y ceniza después de su combustión, así como el poder calorífico de cada una.

**TABLA 3.** Características físicas, químicas y energéticas de la biomasa forestal

Característica	Garrochillo M1	Guácima M2	Palo de agua M3	Palo blanco M4	Popistle M5
% de humedad	10.18	13.32	9.46	11.75	17.82
% de ceniza	2.36	3.28	4.12	1.56	1.52
% de materia volátil	84.25	88.05	83.6	86.13	81.12
Análisis elemental					
% Nitrógeno	0.3263	0.4767	0.3901	0.2575	0.5346
% Carbono	43.1296	42.1653	42.1510	44.0450	42.7121
% Hidrógeno	5.3494	5.2415	5.3950	5.5850	5.2697
% Azufre	0.1248	0.0447	N. D.	N. D.	N. D.
Poder calorífico superior (kJ/kg)	18 776.8	18 851.4	18 372.7	19 572.7	19 911.1

Fuente: Elaboración propia con base en los resultados obtenidos en laboratorio.

Los resultados obtenidos en campo y laboratorio necesarios para estimar el potencial total de la biomasa forestal de acuerdo a cada una de las cinco especies de árboles analizados se presentan en la Tabla 4.

**TABLA 4.** Cálculo del potencial total de la biomasa forestal en la comunidad ejido La Reforma

Nombre común	Densidad forestal	Diámetro (m)	Fuste (m)	Densidad (kg/m <sup>3</sup> )	Poder calorífico superior (kJ/kg)	Superficie (Ha)	Potencial total (kJ)
Guácima	6	1.160	2.36	589	18 851	75	12 471 805 821.6
Garrochillo	13	0.470	3.65	589	18 777	75	6 833 764 575.0
Palo de agua	15	0.720	5.03	692	18 373	75	29 286 932 122.8
Popistle	35	0.400	3.46	589	19 911	75	13 395 714 391.5
Palo blanco	40	0.400	3.98	605	19 573	75	17 774 637 157.1
Potencial (kJ)							79 762 854 068.0
P. biomasa (TJ)							79.76

Fuente: Elaboración propia con base en los resultados obtenidos en laboratorio.

Finalmente, se estimó para la comunidad La Reforma del municipio de Palenque, Chiapas, el potencial energético para cada una de las especies de madera, el potencial energético total (79.76 TJ) y el consumido por la comunidad en un año (10.93 TJ).

De acuerdo a los resultados obtenidos, se deduce que los pobladores disponen de combustible (biomasa forestal) para aproximadamente siete años. Sin embargo, los ejidatarios han destinado una superficie para reserva arbórea y reforestación.

Se considera que se deben propiciar acciones de educación ambiental como la promoción y divulgación del cuidado y preservación del medioambiente, erradicar por completo la cultura de la roza, tumba y quema de los campesinos del sur de México, así como promover el conocimiento de la sustentabilidad. En el aspecto de la salud es importante que las amas de casa tomen conciencia de lo dañino que son los gases resultantes de la combustión de la leña para ellas y para los niños.

## Conclusiones

---

Estimar y conocer el potencial energético de la comunidad representa la importancia en la interacción de la sociedad y el medioambiente. La importancia socioambiental radica en la responsabilidad de la toma de decisiones en la forma de utilizar y cuidar los recursos naturales renovables (biomasa forestal) utilizados como combustible para la cocción de alimentos y el calentamiento del agua para diversas actividades de higiene y domésticas.

Para que la comunidad presente un desarrollo sustentable se requiere del apoyo en infraestructura para que a las viviendas que no cuentan con estufa de gas se les proporcionen estufas ecológicas, que permitirán el ahorro de leña y contribuirían a tener un desarrollo sustentable del ejido. Implementar estufas ecológicas mediante un diseño que tome en cuenta las necesidades de las amas de casa requiere adicionalmente que se tomen acciones de educación y promoción de una nueva cultura para cambiar hábitos y costumbres arraigados en las comunidades rurales, como son que el cocinar con fogón abierto proporciona un mejor sabor de la comida o que los frijoles se preparan más rápido en fogones tradicionales.

Las limitaciones del presente trabajo consisten en que no se estudió la importancia de utilizar fogones en espacios abiertos, así como la falta de un análisis en laboratorio de los gases resultado de la oxidación de la leña, que representa una problemática de salud para las amas de casa y los niños.

Se recomienda para este ejido incidir en espacios destinados para viveros que permitan la preservación de especies de árboles nativas de la región que contribuyan a mejorar la economía y propicien el desarrollo local, aunado a que sea un medio de vida para las futuras generaciones.

Los ejidatarios de La Reforma están inscritos en el programa del Gobierno federal “Sembrando vida” para la reforestación de árboles maderables como teca, cedro y caoba. Los productores reciben \$5 000.00 pesos mensuales por trabajar sus parcelas de lunes a sábado, de los cuales destinan \$500.00 para una caja de ahorro administrada por ellos.

El programa se basa en una economía social y valores comunitarios. Se pudo observar que la educación ambiental que han recibido los ejidatarios ha permeado y forma parte de sus valores, ya que la leña que utilizan para la cocción de alimentos la obtienen de madera muerta que recolectan de la reserva arbórea (DOF, 2021).

Es importante mencionar que los ejidatarios como dueños de sus parcelas y con valores comunitarios como el trabajo en equipo, la solidaridad, la educación informal y la capacitación por parte del programa “Sembrando vida”, se han apropiado de la sustentabilidad energética, permitiéndoles cubrir sus necesidades realizando actividades en pro de conservar el medioambiente local.

Los resultados obtenidos en el estudio sobre las necesidades energéticas en la comunidad ejido La Reforma permiten fortalecer el Objetivo 11 de Desarrollo Sostenible: ciudades y comunidades sostenibles. La información presentada identifica las necesidades que presenta la población rural sobre la energía aplicada mediante la biomasa forestal. Los recursos

naturales forestales están distribuidos de distintas formas por la gran riqueza de especies vegetales que se ubican dentro del ejido, pero la forma más accesible es a través de la apropiación de los recursos en sus acahuales o milpas, espacios destinados a la producción de alimentos principalmente para autoconsumo.

La población mantiene estos espacios como una manera de sustentar las actividades económicas ya que es una fuente de ingresos, incluyendo la recolección de la biomasa forestal (leña) seca, que ha cumplido su ciclo natural, que utiliza para generar energía en sus viviendas sin tener que deforestar especies que no necesita, lo que garantiza el desarrollo sustentable de la región.

La incidencia de esta investigación promueve la importancia que representan los recursos para las sociedades que disponen de ellos de una forma libre, lo que conlleva a establecer responsabilidades entre los seres humanos con su medio natural. Su explotación genera su uso, pero también la disponibilidad para las futuras generación. De esta manera se incide en esta propuesta de colaboración, ya que es necesario establecer los alcances de la relación sociedad-naturaleza en un contexto donde la degradación socioambiental está en un proceso de repercusión sobre la variabilidad climática global.

## **AGRADECIMIENTOS**

*Este trabajo fue realizado mediante el apoyo de una Beca Nacional para Maestría del Conahcyt y cumple con los objetivos establecidos en la aplicación del conocimiento científico-técnico al servicio de las comunidades más desfavorecidas y con un impacto social directo, ya que fueron presentados los resultados ante la comunidad para futuros proyectos en otras regiones del país en condiciones de sustentabilidad.*

## REFERENCIAS

- Ayala, M. B. (2018). *Revisión de indicadores de sustentabilidad para energías renovables* [Tesis de licenciatura]. Universidad Nacional Autónoma de México. Repositorio institucional. <http://132.248.9.195/ptd2018/marzo/0772039/Index.html>
- Carta, G. J. A., Calero, P. R., Colmenar, S. A., y Castro, G. M. A. (2009). *Centrales de energías renovables: generación eléctrica con energías renovables* (1ª ed.). Editorial Pearson Educación.
- Clean Cooking Alliance. (2022). *Protocols*. <https://cleancooking.org/research-evidence-learning/standards-testing/protocols/>
- Comisión Mundial sobre el Medio Ambiente y el Desarrollo. (1987). *Nuestro futuro común, Informe Brundtland*. ONU, CMMAD. [http://www.ecominga.uqam.ca/PDF/BIBLIOGRAPHIE/GUIDE\\_LECTURE\\_1/CMMAD-Informe-Comision-Brundtland-sobre-Medio-Ambiente-Desarrollo.pdf](http://www.ecominga.uqam.ca/PDF/BIBLIOGRAPHIE/GUIDE_LECTURE_1/CMMAD-Informe-Comision-Brundtland-sobre-Medio-Ambiente-Desarrollo.pdf)
- Diario Oficial de la Federación. (2021). *Acuerdo por el que se emiten las reglas de operación del programa Sembrando Vida, para el ejercicio fiscal 2021*. [https://www.dof.gob.mx/nota\\_detalle.php?codigo=5608917&fecha=28/12/2020#gsc.tab=0](https://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5608917&fecha=28/12/2020#gsc.tab=0)
- Díaz, J. R. (2000). *Consumo de leña en el sector residencial de México: evolución histórica y emisiones de CO2* [Tesis de maestría]. Universidad Nacional Autónoma de México. <https://repositorio.unam.mx/contenidos/108792>
- García-Benítez, M. (2021). *Implicaciones de los estudios socioambientales en proyectos de energías renovables: una visión desde lo local* [Conferencia en línea]. Semana de divulgación de la ciencia y la ingeniería 2021. Universidad de Ciencias y Artes de Chiapas, Instituto de Investigación e Innovación en Energía. Tuxtla Gutiérrez, Chiapas, México.
- García-Hernández, L. S. (2016). *Energía eólica y desarrollo sostenible en la región de*

*La Rumorosa, municipio de Tecate. Un análisis multicriterio* [Tesis de maestría]. El Colegio de la Frontera Norte. Repositorio institucional. <https://www.colef.mx/posgrado/tesis/20141175/>

Ghilardi, A., Guerrero, G., y Masera, O. (2007). Spatial analysis of residential fuelwood supply and demand patterns in Mexico using the WISDOM approach. *Biomass and Bioenergy*, 31(7), 475-491. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2007.02.003>

Harris, J. M. (2003). *Sustainability and sustainable development*. International Society for Ecological Economics, Internet Encyclopedia of Ecological Economics. <https://isecoeco.org/pdf/susdev.pdf>

Insah, I., y Subhes, C. B. (2015). Sustainable Energy Development Index: A multi-dimensional indicator for measuring sustainable energy development. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 50, 513-530. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.05.032>

Instituto Nacional de Estadística y Geografía. (2019). *Carta de uso de suelo y vegetación. Serie VI. Escala 1:250 000*. INEGI. <https://www.inegi.org.mx/temas/usuarios/#Descargas>

Instituto Nacional de Estadística y Geografía. (2020). *Censo general de población y vivienda 2020*. INEGI. <http://www.inegi.org.mx>

Instituto Nacional de Estadística y Geografía. (2020a). *Marco geoestadístico nacional*. INEGI. <http://www.inegi.org.mx>

International Atomic Energy Agency. (2007). *Energy indicators for sustainable development: Country studies on Brazil, Cuba, Lithuania, Mexico, Russian Federation, Slovakia and Thailand*. IAEA. [https://www.un.org/esa/sustdev/publications/energy\\_indicators/full\\_report.pdf](https://www.un.org/esa/sustdev/publications/energy_indicators/full_report.pdf)

Junemann A., y Legarreta, G. (2007). Inhalación de humo de leña, una causa relevante pero poco reconocida de enfermedad pulmonar obstructiva crónica. *Revista Argentina de Medicina Respiratoria*, 2, 51-57. [http://www.ramr.org/articulos/volumen\\_7\\_numero\\_2/articulo\\_especial/articulo\\_especial\\_inhalacion\\_de\\_humo\\_de\\_lena\\_una\\_causa\\_relevante\\_pero\\_poco\\_reconocida.pdf](http://www.ramr.org/articulos/volumen_7_numero_2/articulo_especial/articulo_especial_inhalacion_de_humo_de_lena_una_causa_relevante_pero_poco_reconocida.pdf)

- Langbein, J. (2017). Firewood, smoke and respiratory diseases in developing countries-The neglected role of outdoor cooking. *PLoS ONE* 12(6), e0178631. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0178631>
- López, I. G. (2020). *Desarrollo sostenible* (1ª ed.). Editorial Elearning S. L.
- Masera, O. (1993). *Sustainable fuelwood use in rural Mexico. Volume I: Current patterns of resource use*. International Energy Studies and Environment Division, Lawrence Berkeley Laboratory. [https://digital.library.unt.edu/ark:/67531/mctadc1278484/m2/1/high\\_res\\_d/10120679.pdf](https://digital.library.unt.edu/ark:/67531/mctadc1278484/m2/1/high_res_d/10120679.pdf)
- Organización para la Cooperación y Desarrollo Económico. (2007). *Estudios de política rural: México*. OCDE. [http://centro.paot.org.mx/documentos/sagarpa/estudio\\_de\\_ocde.pdf](http://centro.paot.org.mx/documentos/sagarpa/estudio_de_ocde.pdf)
- Organización de las Naciones Unidas. (2017). *La agenda para el Desarrollo Sostenible*. ONU. <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/development-agenda/>
- Perevochtchikova, M. (2013). La evaluación del impacto ambiental y la importancia de los indicadores ambientales. *Gestión y Política Pública*, 22(2), enero 2013. [http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1405-10792013000200001](http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1405-10792013000200001)
- Prehn, M., y Cumana, I. (2010). La bioenergía en México: estudios de caso No. 1, 2010. *Cuadernos temáticos sobre Bioenergía*, 1, septiembre de 2010. <https://rembio.org.mx/wp-content/uploads/2023/05/CT1.pdf>
- Secretaría de Energía. (2022). *Balance Nacional de Energía 2021*. Sener. <https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/805509/BNE-2021.pdf>

# CAPÍTULO 6.

## SISTEMAS PARA UNA PRODUCCIÓN AGRÍCOLA SUSTENTABLE BASADA EN ENERGÍAS RENOVABLES: CASO DE ESTUDIO EN VALLES CENTRALES, OAXACA

**Ulises Dehesa Carrasco,<sup>1</sup> Jonathan Ibarra Bahena<sup>2\*</sup>**

<sup>1</sup>Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. Paseo Cuauhnáhuac 8532, colonia Progreso, 62550. Jiutepec, Morelos, México. ulises\_dehesa@tlaloc.imta.mx

<sup>2</sup>Instituto de Energías Renovables, Universidad Nacional Autónoma de México. Privada Xochicalco S/N, col. Centro, 62580. Temixco, Morelos, México.

\*jibarra@ier.unam.mx

### Resumen

**M**ejorar la productividad agrícola, al mismo tiempo que se minimiza el consumo de combustibles fósiles para el desarrollo de esta actividad, es un requisito esencial para que los agricultores incrementen la producción de alimentos de manera sostenible y sustentable. Las diversas comunidades en las que la agricultura es su actividad principal están en el centro de cualquier proceso de cambio que involucre recursos naturales y necesitan ser alentadas y guiadas para conservar los ecosistemas naturales y su biodiversidad, así como mitigar el impacto negativo que la agricultura puede tener en el medioam-

biente. En el presente trabajo se describe el proceso participativo de diseño, instalación y puesta en marcha de unidades demostrativas de riego eficiente impulsadas con energías renovables en comunidades de Valles Centrales, estado de Oaxaca, así como la implementación de reglamentos comunitarios de gestión hídrica y estudios de calidad del agua de 12 sitios de la zona de estudio.

Palabras clave: **Agua; agricultura; energías renovables; uso eficiente del agua.**

---

## **Abstract**

To improve agricultural productivity, while the fossil fuels consumption is reduced, is a fundamental requirement to increase food production in a sustainable way. Communities which agriculture is the primary activity must be at the mean of any process involving natural resources management; these communities need to be encouraged and guided to conserve natural ecosystems and biodiversity and mitigate the negative impact produced by the agriculture. In this paper the participatory process of design, installation and start-up of efficient irrigation units powered by renewable energy in communities of Valles Centrales, Oaxaca, is described, as well as the community regulations implementation for water management and the water quality studies for 12 sites in the study area.

Keywords: **Water; agriculture; renewable energy; efficient water use.**

## Introducción

Debido al cambio climático, la urbanización y el crecimiento de la población, la demanda global de recursos naturales está creciendo de manera acelerada. Particularmente, los requerimientos de agua, energía y alimentos podrían aumentar hasta 50 % para el año 2050 en comparación con 2015 (Vahabzadeh et al., 2023). Actualmente, las actividades agrícolas consumen 7 500 km<sup>3</sup> de agua dulce, lo que representa 70 % de los recursos hídricos que se extraen a nivel mundial (Lahlou et al., 2023). Aunque se espera que las prácticas de riego y los rendimientos de producción mejoren, se estima que la extracción por parte de este sector aumente a 8 515 km<sup>3</sup> para 2050 (FAO, 2017).

Adicionalmente, alrededor del 32 % de la energía consumida globalmente está relacionada con la producción y la cadena de suministro de alimentos (FAO, 2011). Se espera que esta situación se agrave en las siguientes décadas, ya que será necesario producir 60 % más de alimentos para la población mundial en 2050 (FAO, 2014). Gran parte de la inseguridad alimentaria proyectada para mediados de este siglo se encontrará en los hogares pobres de países con ingresos más bajos y en áreas donde los recursos naturales agotados o degradados ya no sustentan actividades productivas viables para los pequeños agricultores, tal y como ocurre actualmente. Sumado a esto, las áreas rurales con mayor pobreza, desnutrición e inseguridad alimentaria generalmente también son aquellas con mayor degradación del agua y la tierra (Vosti y Reardon, 1997). Esto requiere un enfoque de gestión integrado en el contexto de los sistemas agroecológicos para preservar los servicios ecosistémicos para los humanos y la naturaleza, y un mayor financiamiento en mejoras integradas de recursos de tierra y agua en estas áreas (Bhaduri et al., 2015).

Con la finalidad de promover el uso eficiente de los recursos hídricos y asegurar la sostenibilidad de la extracción y el abastecimiento de agua dulce, así como facilitar el acceso a la investigación y la tecnología relativas a las energías renovables, ambos propósitos contemplados en los

Objetivos de Desarrollo Sostenible (ONU, 2018), en el presente trabajo se describe el proceso de diseño, instalación y puesta en marcha de unidades demostrativas de riego eficiente impulsadas con energías renovables en comunidades de Valles Centrales, estado de Oaxaca.

## Descripción de la zona de estudio

Valles Centrales es una región que comprende los valles de ETLA, Tlacolula y Zimatlán-Zaachila-Ocotlán que cuenta con una extensión territorial de 11 987.6 km<sup>2</sup>, lo que representa 17 % de la superficie del estado de Oaxaca. Está integrado por siete distritos: Ocotlán, Zimatlán, Zaachila, ETLA, Ejutla, Tlacolula y Centro; se subdivide en 121 municipios y cuenta con 1 107 557 habitantes (INEGI, 2015). El 56 % de los municipios de esta región presenta índices de marginación altos y muy altos, mientras que 50 % presenta grados altos y muy altos respecto al rezago social (Coneval, 2015). Respecto a los recursos hídricos, Valles Centrales se encuentra en la Región Hidrológica 20 Costa Chica de Guerrero, en la Subregión 20B Costa Chica-Río Verde, cuenca del río Atoyac. La disponibilidad media de agua subterránea es de 12.61 hm<sup>3</sup>/año, el volumen de extracción es de 122.6 hm<sup>3</sup>/año, el volumen total concesionado es de 121.7 hm<sup>3</sup>/año, mientras que la recarga es de 153.6 hm<sup>3</sup>/año (DOF, 2018). La agricultura y los servicios públicos urbanos consumen 97 % del volumen concesionado (Nava y Medrano-Pérez, 2019).

En 1967 se decretó una veda que limitaba, por tiempo indefinido, el aprovechamiento de aguas del subsuelo, la cual aplicaba a una porción del acuífero Valles Centrales 2025. Adicionalmente, entre 2003 y 2005 disminuyó la disponibilidad de agua en la microcuenca Xnizaa, lo que dio origen a un proceso organizativo que derivó en la formación de la Coordinadora de Pueblos Unidos para el Cuidado y la Defensa del Agua (Copuda) conformada por 16 comunidades: San Antonino Castillo Velasco, Santiago Apóstol, Santa Ana Zegache, San Martín Tilcajete, San Pe-

dro Apóstol, San Pedro Mártir, Asunción Ocotlán, San Jacinto Ocotlán, San Sebastián Ocotlán, La Barda Paso de Piedras, Tejas de Morelos, San Felipe Apóstol, San Matías Chilazoa, Maguey Largo, El Porvenir y San Isidro Zegache.

El Centro de Derechos Indígenas Flor y Canto A. C. se constituyó, a través de los años, como la organización asesora de la Copuda. Juntos, en 2015, iniciaron un proceso de consulta, de la cual se derivó el reconocimiento y otorgamiento del derecho de las comunidades indígenas a contar con un título de concesión comunitaria, lo que les obliga y compromete a cuidar el agua y el ecosistema.

Este acercamiento dio como resultado, en el año 2021, el decreto que establece la zona reglamentada del acuífero 2025 de Valles Centrales, el cual suspende la veda y permite a las comunidades participar en la administración coordinada, control de la extracción, explotación, uso y conservación de las aguas del subsuelo. En este proceso, el Instituto Nacional de los Pueblos Indígenas (INPI) emprendió una intervención y la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (Semarnat) convocó al Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA) en octubre-diciembre de 2021 con el propósito de acompañar a las comunidades y dar cumplimiento a los objetivos establecidos mediante implementación de reglamentos comunitarios, tecnificación del riego agrícola y caracterización de la calidad del agua de 12 sitios en Valles Centrales, Oaxaca.

## Metodología

### Implementación de reglamentos comunitarios

Los reglamentos comunitarios son un conjunto de normas que buscan regular bajo los principios de equidad la distribución del agua, cuidando la sostenibilidad de un ecosistema frágil y con escasez. Estos reglamentos fueron elaborados por un grupo de especialistas multidisciplinarios y aprobados mediante asambleas comunitarias. Una vez ava-

lados estos reglamentos, su implementación requería de un abordaje de intervención estratégica participativa. La intervención se propuso para desarrollarse en tres etapas mediante visitas a campo: una primera para la obtención de información diagnóstica a través de material bibliográfico y entrevistas a profundidad colectivas; una segunda, para la concientización sobre la sostenibilidad y equidad en la gestión del acuífero y la planeación participativa, en la que se realizaron dos talleres; y finalmente, en la tercera visita, se realizó la entrega de las memorias de trabajo.

### **Tecnificación del riego agrícola**

Como parte de los acuerdos comunitarios, se establece que la manera más adecuada para dar a conocer la importancia de la tecnificación del riego agrícola es a través de unidades demostrativas de producción y riego tecnificado. Estas unidades demostrativas consisten en pequeñas parcelas productivas que servirán como espacio de intercambio de conocimientos técnicos especializados y saberes locales. Con ese propósito fueron seleccionadas cinco comunidades para visita de campo, mediante un proceso interno tomando en consideración diversos aspectos como la ubicación de la comunidad y accesos, cercanía con otras comunidades y compromiso comunitario. Una vez identificadas las comunidades se realizó la intervención empleando la siguiente metodología: se realizaron cuatro visitas de campo, la primera consistió en un acercamiento a las comunidades, la segunda tuvo como objetivo la formalización de acuerdos, la tercera fue para la instalación de equipos y la cuarta visita para la entrega de resultados. Cada uno de los recorridos de campo contó con el acompañamiento de IMTA, INPI, autoridades de la Copuda y de Flor y Canto A. C., una organización civil que ha asesorado durante el proceso de defensa de la tierra y el agua a las comunidades de Valles Centrales, Oaxaca.

## **Monitoreo de la calidad del agua de 12 sitios en Valles Centrales, Oaxaca**

En julio de 2021 se realizó una visita prospectiva en seis localidades de Valles Centrales con el fin de establecer un conocimiento base sobre la problemática de calidad del líquido que las comunidades perciben en sus cuerpos de agua, los cuales consisten en hoyas de almacenamiento o retenes ubicados en las corrientes superficiales de la cuenca. Mediante estas estructuras hidráulicas se busca promover la infiltración a los mantos acuíferos de agua para uso agrícola. Los problemas que las autoridades locales perciben son dos: la contaminación de dichos cuerpos por la actividad minera de la zona y el aporte de agroquímicos por influencia de las zonas de cultivo que rodean dichas obras de aprovechamiento e infiltración. Con respecto a los pozos de abastecimiento, también existe preocupación de ser afectados por la presencia de contaminantes provenientes de las actividades antes mencionadas.

De la visita se acordó efectuar la caracterización de la calidad del agua de siete hoyas u obras de retención, un pozo de infiltración y cuatro pozos de abastecimiento, para un total de 12 sitios. Por lo anterior, se realizaron las gestiones pertinentes para dar cumplimiento al siguiente objetivo: caracterizar la calidad del agua de 12 sitios de aprovechamiento para riego, consumo humano y recarga, con el propósito de identificar la presencia de contaminantes convencionales en los mismos, tomando como referencia la normativa actual y los criterios de calidad vigentes. Con los resultados de calidad del agua tanto históricos como los obtenidos de una campaña de muestreo, se compararon los valores con criterios actuales nacionales para determinar el estado de contaminación que presentan los sitios seleccionados.

## Resultados

---

### Resultados de la implementación de reglamentos comunitarios

Derivado de la implementación, el área de participación social del IMTA concluyó que en un abordaje bajo la perspectiva de interculturalidad que implica el reconocimiento de los usos y costumbres para la garantía del derecho al agua de pueblos indígenas, son fundamentales los principios de equidad para la distribución del agua, cuidando la sostenibilidad de un ecosistema frágil y con escasez. Las labores que llevan a cabo la Copuda y el Centro de Derechos Indígenas Flor y Canto A. C. para el cuidado y la defensa del territorio tienen por delante el reto de mantener la calidad del agua, procurando la disminución de descargas urbanas, de empresas extractivas y de agricultura a gran escala (Semarnat, 2024).

Por ello, consideran importante avanzar hacia la eliminación de los agroquímicos mediante prácticas agroecológicas. Por otra parte, un acuífero con alta presencia de obras de recarga es más vulnerable al no contar con un proceso natural de filtración, por esto, atender la Norma 015 de la Conagua (NOM-015-CONAGUA-2007, infiltración artificial de agua a los acuíferos. Características y especificaciones de las obras y del agua) es fundamental (Semarnat, 2024).

Los reglamentos internos comunitarios son un primer ejercicio que irá nutriéndose de la experiencia. Implican profundizar en la articulación regional, especialmente para establecer los criterios de distribución del agua entre localidades, usos y usuarios. Localmente las autoridades y los comités fungirán como coadministradores, por lo que deben tener claros y transparentes los criterios de distribución. Esta tarea no pueden asumirla los responsables de los cargos o representantes de las cabeceras municipales. El acompañamiento de la ciudadanía será el corazón de este proceso histórico.

Desde una perspectiva personal concebimos dos posibles sentidos: un componente técnico comunitario que monitoree el estado del acuífero y mida el nivel de agua en puntos cercanos y lejanos de las obras de captación. Este podría ir incorporando otro tipo de variables, como la calidad, de modo que las comunidades cuenten con información actualizada, generada por ellas mismas. Otro componente que surge de los debates de los talleres se relaciona con la necesidad de una contraloría ciudadana que pueda velar por la transparencia y la equidad, contribuyendo a prevenir posibles conflictos derivados del uso de un recurso limitado y vulnerable. Para ello, robustecer la articulación con organizaciones de la sociedad civil organizada y dependencias gubernamentales será fundamental en el fortalecimiento de capacidades en temas técnicos, legales y sociales.

### **Resultados de la implementación y tecnificación del riego agrícola**

#### *Primera visita: el acercamiento a las comunidades*

Cada una de las visitas técnicas se inició con una reunión con los representantes de los comités locales por el cuidado y la defensa del agua y, en algunas ocasiones, se contó con la presencia de un representante de autoridades municipales, ejidales y otras. Los recorridos comenzaron con una breve reunión explicativa para que las autoridades de los comités y los dueños de las parcelas supieran de las características del proyecto y de sus alcances, y sobre la importancia de contar con unidades demostrativas de riego tecnificado cuyo componente principal es la participación social, evitando con ello generar falsas expectativas y resolviendo dudas que pudieran surgir.

El primer objetivo de la visita fue realizar un acercamiento y recorrido de campo para informar a las comunidades la importancia de la tecnificación en el riego, así como conocer cuáles eran las condiciones que prevalecían en las parcelas agrícolas. Se les explicó que estas debían contar con requisitos que posibilitaran y garantizaran la instalación de un

paquete tecnológico para el riego, por medio de bombeo solar, el cual permitiera un uso más eficiente del agua.

Los requisitos establecidos fueron:

- Que se tratara de una parcela que ya estuviera intervenida, es decir, preparada para la siembra.
- Que tuviera un pozo de agua próximo.
- Que estuviera libre de obstáculos (p. ej. árboles o alguna estructura) para permitir la instalación de un tinaco de agua.
- Que tuviera condiciones de seguridad.
- Que hubiera participación de la comunidad.

Con base en el plan de trabajo, se realizaron los recorridos en 15 parcelas de siembra en cinco comunidades que conforman la Copuda en Valles Centrales, Oaxaca: El Porvenir, San Sebastián, San Antonino, San Pedro Apóstol y San Matías.

Como resultado de la visita, por cada una de las parcelas se emitió una opinión técnica que fue entregada a los comités locales; asimismo, se hizo de conocimiento al propietario de la parcela cuáles son las características que prevalecen en el lugar y la importancia de los criterios de elegibilidad para instalar la unidad demostrativa. Finalmente, en una sesión interna las comunidades establecieron las ubicaciones demostrativas. En todo momento se motivó a los integrantes de los comités locales, dueños de las parcelas, autoridades de la Copuda, ejidales y municipales a participar en este proyecto, porque el compromiso y el trabajo es la única forma en que se pueden obtener buenos resultados.

### *Segunda visita: formalización de acuerdos*

Una vez que las comunidades seleccionaron las parcelas donde se instalarían las unidades demostrativas, se realizó una segunda visita para la formalización del acuerdo, así como para llevar a cabo el levantamiento de especificaciones técnicas con el fin de cuantificar material eléctrico y de uso hidráulico. En la Figura 1 se muestra el sitio seleccionado en la comunidad de El Porvenir, donde se midió la profundidad del pozo, así como las distancias entre el pozo y el lugar de instalación del tinaco y los paneles fotovoltaicos.

**FIGURA 1.** *Sitio seleccionado en El Porvenir*



Fuente: Elaboración propia.

**FIGURA 2.** *Sitio seleccionado en San Antonino*



Fuente: Elaboración propia.

Posteriormente se visitó la comunidad de San Antonino con el propósito de realizar las distintas mediciones para los trabajos de instalación de las unidades demostrativas. La Figura 2 muestra este proceso.

En las Figuras 3 y 4 se pueden ver las parcelas seleccionadas en las comunidades de San Sebastián y San Matías, respectivamente.

**FIGURA 3.** *Sitio seleccionado en San Sebastián*



Fuente: Elaboración propia.

**FIGURA 4.** *Sitio seleccionado en San Matías*



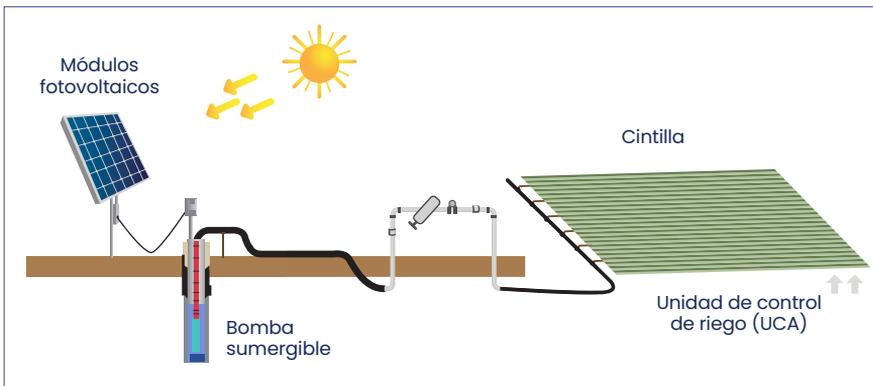
Fuente: Elaboración propia.

### *Tercera visita: la instalación*

Se instalaron los sistemas de riego de baja carga en los sitios seleccionados, para ello se emplearon dos configuraciones: sistema de riego solar conectado de manera directa a cintillas de riego (Figura 5) y siste-

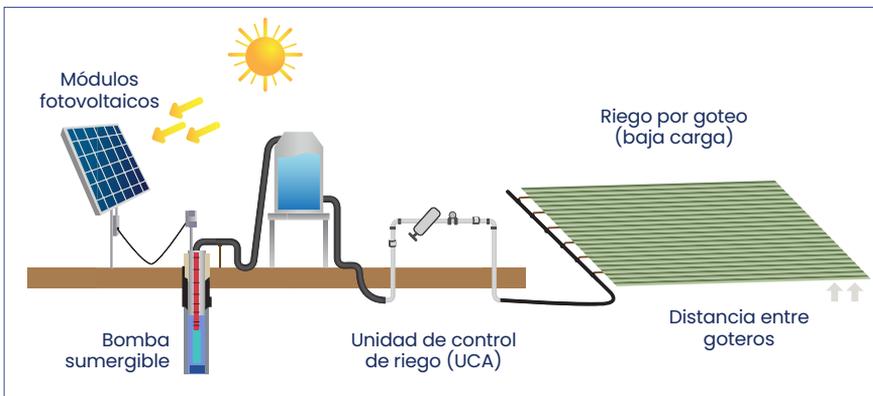
ma de riego solar de baja carga a través de un tinaco (Figura 6). En cada una de las parcelas seleccionadas fueron instaladas ambas configuraciones, que funcionan con una bomba alimentada por módulos fotovoltaicos (solares) y se regulan con una válvula que se encuentra en la unidad de control de riego (UCA). Ambos sistemas pueden operarse de manera individual o simultánea.

**FIGURA 5.** Configuración 1: sistema de riego solar conectado directamente a cintillas de riego



Fuente: Elaboración propia.

**FIGURA 6.** Configuración 2: sistema de riego solar de baja carga

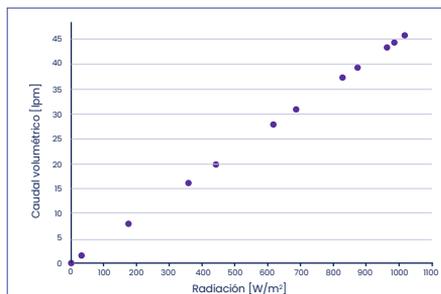


Fuente: Elaboración propia.

A partir de los datos experimentales recabados se determinó, como se muestra en la Figura 7, que el caudal volumétrico proporcionado por la bomba es una función lineal respecto a la radiación solar incidente sobre el panel fotovoltaico.

En la Figura 8 se muestra el proceso de la instalación de la unidad de control de riego y los paneles fotovoltaicos ensamblados y conectados a la bomba en la comunidad de El Porvenir.

**FIGURA 7.** *Relación entre el flujo volumétrico y la radiación solar*



Fuente: Elaboración propia.

**FIGURA 8.** *Instalación de la unidad de control de riego y los paneles fotovoltaicos*



Fuente: Elaboración propia.

Posteriormente se instaló el sistema de riego en la parcela de San Antonino. En la Figura 9 se muestra la unidad de control de riego y el tinaco elevado atrás, además del sistema completo, donde al fondo se pueden apreciar los paneles fotovoltaicos.

**FIGURA 9.** Sistema de riego solar de baja carga instalado en San Antonino



Fuente: Elaboración propia.

El tercer sitio donde se instaló el sistema de riego fue en San Sebastián. En la Figura 10 puede verse la instalación de la red de riego y los paneles ensamblados y conectados a la bomba, donde en primer plano aparece el pozo.

Por último, se instaló el sistema de riego en la parcela de la comunidad de San Matías. En la Figura 11 se puede ver la instalación de la unidad de control de riego y el tinaco elevado.

**FIGURA 10.** Sistema de riego solar de baja carga instalado en San Sebastián



Fuente: Elaboración propia.

**FIGURA 11.** Sistema de riego solar de baja carga instalado en San Matías



Fuente: Elaboración propia.

### *Cuarta visita: entrega de unidades demostrativas*

En una cuarta visita se llevó a cabo la entrega oficial de las unidades demostrativas. La primera comunidad seleccionada fue El Porvenir. En la Figura 12 se muestran aspectos de la entrega y la explicación sobre el uso del sistema al resguardante de la parcela demostrativa.

**FIGURA 12.** *Entrega de la unidad demostrativa en la comunidad El Porvenir*



Fuente: Elaboración propia.

Posteriormente se le hizo entrega y explicación sobre la operación del sistema al resguardante de la parcela demostrativa en San Matías (Figura 13).

**FIGURA 13.** *Entrega de la unidad demostrativa en la comunidad de San Matías*



Fuente: Elaboración propia.

El tercer lugar donde se entregó el sistema de riego fue en San Antonino, donde se le explicó al resguardante de la parcela demostrativa (dueño del predio) la forma de operación. En esta entrega estuvieron presentes la representante de la asociación civil Flor y Canto y las autoridades de la comunidad (Figura 14).

Por último, en la comunidad de San Sebastián se entregó y explicó la forma de operación del sistema de riego al resguardante de la parcela demostrativa (Figura 15).

**FIGURA 14.** Entrega de la unidad demostrativa en la comunidad de San Antonino



Fuente: Elaboración propia.

**FIGURA 15.** Entrega de la unidad demostrativa en la comunidad de San Sebastián



Fuente: Elaboración propia.

### *Resultados de la caracterización de la calidad del agua de 12 sitios en Valles Centrales, Oaxaca*

Los resultados de sitios superficiales indican que el punto más contaminado es la represa en San Antonino SM12, al superar cuatro de los 16 parámetros establecidos para el uso de riego. Este sitio recibe las aguas residuales de la localidad de San Antonino y la planta de tratamiento que se encuentra fuera de operación; además, se tiene la presencia del basurreo en las inmediaciones de la corriente en donde se encuentra la represa. Es importante que las autoridades aceleren la construcción de una nueva planta de tratamiento, lo que permitiría mejorar la calidad del agua del cuerpo receptor y reducir el impacto que ocasiona actualmente a las localidades ubicadas aguas debajo de San Antonino.

Los parámetros con más incidencia en los retenes u hoyas de captación son los sólidos suspendidos y disueltos totales, seguidos del hierro en dos sitios y fluoruro y coliformes fecales en otro. Estos valores por encima de los criterios pueden afectar los cultivos, por lo que es importante revisar las prácticas actuales para seleccionar los cultivos más adecuados en función a la calidad del agua. Se recomienda llevar a cabo un inventario de uso de agroquímicos en las dos subcuencas de estudio para conocer las tasas de aplicación, qué agentes químicos son los más utilizados y determinar la distribución espacial de la aplicación de estos.

El rendimiento agrícola depende varios factores como clima, manejo de abonos, control de plagas y tipos de cultivo, entre otros. Sin embargo, en este estudio únicamente se toma en consideración el incremento de la producción por la tecnificación garantizando el volumen de agua que requiere cada cultivo. La Tabla 1 muestra algunos de los valores de producción para diferentes cultivos empleando la tecnología propuesta.

Con base en el diagnóstico de las prácticas agrícolas de las comunidades intervenidas se observó un manejo inadecuado del recurso hídrico, por lo que un programa de riego tecnificado, como el descrito en este

trabajo, potenció la productividad de las parcelas. Uno de los beneficios inmediatos fue el uso eficiente del agua y la energía. Dado que los sistemas de bombeo solar tienen una vida útil de 20 años con un cambio y/o mantenimiento de la bomba cada cuatro años, se puede garantizar una producción agrícola sustentable y sostenible. Los sistemas solares descritos en este trabajo pueden ser escalables, sin embargo, los costos de inversión están asociados al dimensionamiento del equipo. En particular, el sistema descrito tiene un costo aproximado de \$45 000 MXN y se estima que se amortizará en 3.8 años.

## Conclusiones

En el presente trabajo se describe el proceso participativo de diseño, instalación y puesta en marcha de unidades demostrativas de riego eficiente impulsadas con energías renovables en comunidades de Valles Centrales, estado de Oaxaca. Los reglamentos comunitarios de gestión hídrica se elaboraron bajo la perspectiva de interculturalidad, que implica el reconocimiento de los usos y costumbres de pueblos indígenas, así como los principios de equidad para la distribución del agua y sostenibilidad ambiental. Estos reglamentos fueron un primer ejercicio comunitario sobre la gobernanza del agua que irá nutriéndose de la experiencia, para lo cual las autoridades y los comités fungirán como coadministradores, por lo que deben tener claros y transparentes los criterios de distribución.

Se diseñaron e instalaron cuatro unidades demostrativas de riego tecnificado que utilizan energía solar fotovoltaica, con lo cual se acerca a la población la investigación y la tecnología relativas a las energías renovables. Estas unidades estarán destinadas para el intercambio técnico especializado, así como de saberes locales para un uso eficiente de los

**TABLA 1.** Producción agrícola con la tecnología propuesta

Cultivo	Volumen de producción	Estimación en kg
Tomatillo	12 cajas	300
Cilantro	500 rollos	1 750
Terciopelo	80 rollos	3 200
Maíz	50 costales	1 500
Ruda	900 rollos	450
Cebolla	30 costales	600
Jícama	25 surcos	3 000
Frijol	25 surcos	100

Fuente: Elaboración propia

recursos hídricos y asegurar la sostenibilidad de la extracción y el abastecimiento de agua dulce, además de garantizar la producción agrícola sostenible de la región. Con esta transferencia tecnológica hacia estas comunidades se promueve el acceso universal al conocimiento en beneficio de las regiones resilientes.

Se realizaron estudios de calidad del agua de 12 sitios de la zona. Los resultados de sitios superficiales indican que el punto más contaminado es la represa en San Antonino SM12, al superar cuatro de los 16 parámetros establecidos para el uso de riego. A partir de estos resultados, se recomienda a las autoridades locales la construcción de una nueva planta de tratamiento, lo que permitiría mejorar la calidad del agua del cuerpo receptor y reducir el impacto que ocasiona actualmente a las localidades ubicadas aguas debajo de San Antonino. Los parámetros que más incidencia tienen en los retenes u hoyas de captación son los sólidos suspendidos y disueltos totales, seguidos del hierro en dos sitios y fluoruro y coliformes fecales en otro. Se recomienda llevar a cabo un inventario de uso de agroquímicos en las dos subcuencas de estudio.

Algunos de los problemas globales como conflictos sociales y la profundización de las desigualdades están estrechamente relacionados con la inseguridad alimentaria, por lo tanto, el desarrollo sustentable de la agricultura y de los medios de producción es fundamental. Para esto se debe contar con fuentes de energías limpias y asequibles, así como un manejo integral de las fuentes disponibles de agua dulce, todo esto de la mano de los habitantes de las diversas comunidades y así promover asentamientos inclusivos, sostenibles y resilientes. Al poner al centro de todo avance y cambio a las comunidades, el progreso de los Objetivos de Desarrollo Sostenible de la Agenda 2030 será permanente y constante, lo cual garantizará los medios de subsistencia de las generaciones actuales y futuras.

## **AGRADECIMIENTOS**

*Los autores agradecen al IMTA a través de los proyectos RD2105.1 y RD2204.1 por el apoyo económico para el desarrollo de este trabajo. Los autores agradecen también a Olga García Villa por el apoyo técnico brindado. Jonathan Ibarra Bahena agradece al Conahcyt por la beca “Estancias posdoctorales por México para la formación y consolidación de las y los investigadores por México”.*

## REFERENCIAS

- Bhaduri, A., Ringler, C., Dombrowski, I., Mohtar, R., y Scheumann, W. (2015) Sustainability in the water-energy-food nexus. *Water International*, 40(5-6), 723-732. <https://doi.org/10.1080/02508060.2015.1096110>
- Consejo Nacional de Evaluación de la Política de Desarrollo Social. (2015). *Medición de pobreza multidimensional a nivel municipal 2015*. Coneval. <https://www.coneval.org.mx/Medicion/Paginas/Pobreza-municipal.aspx>
- Diario Oficial de la Federación. (2018). *Acuerdo por el que se actualiza la disponibilidad media anual de agua subterránea de los 653 acuíferos de los Estados Unidos Mexicanos, mismos que forman parte de las regiones hidrológico-administrativas que se indican*. [https://dof.gob.mx/nota\\_detalle.php?codigo=5708074&fecha=09/11/2023#gsc.tab=0](https://dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5708074&fecha=09/11/2023#gsc.tab=0)
- Food and Agriculture Organization. (2011). *Energy-smart food for people and climate. Issue paper*. FAO. <https://www.fao.org/4/i2454e/i2454e00.pdf>
- Food and Agriculture Organization. (2014). *The water-energy-food nexus. A new approach in support of food security and sustainable agriculture*. FAO. <https://openknowledge.fao.org/server/api/core/bitstreams/86fe97cc-4a38-4511-a37f-8eb8ea8fe941/content>
- Food and Agriculture Organization. (2017). *Water for sustainable food and agriculture*. FAO. <https://www.developmentaid.org/api/frontend/cms/file/2023/02/i7959e.pdf>
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía. (2015). *Encuesta intercensal 2015*. INEGI. <https://www.inegi.org.mx/programas/intercensal/2015/>
- Lahlou, F. Z., AlNouss, A., Govindan, R., Hazrat, B., Mackey, H. R., y Al-Ansari, T. (2023). Water and sludge resource planning for sustainable agriculture: An energy-water-food-waste nexus approach. *Sustainable Production and Consumption*, 38, 130-148. <https://doi.org/10.1016/j.spc.2023.03.027>

- Naciones Unidas. (2018). *Objetivos de Desarrollo Sustentable*. ONU. <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/objetivos-de-desarrollo-sostenible/>
- Nava, L. F., y Medrano-Pérez, O. R. (2019). Retos y oportunidades de la gestión de los recursos hídricos subterráneos: aproximación al problemático acceso al agua en Valles Centrales de Oaxaca, México. *Acta Universitaria*, 29, 1-20. <https://doi.org/10.15174/au.2019.2429>
- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. (2024). *Coordinadora de Pueblos Unidos para el Cuidado y la Defensa del Agua. Valles Centrales de Oaxaca*. Semarnat. <https://eventos.semarnat.gob.mx/files/uploads/rodolfo/2024/06/12/16-may-informe-copuda.pdf>
- Vahabzadeh, M., Afshar, A., y Molajou, A. (2023). Framing a novel holistic energy subsystem structure for water-energy-food nexus based on existing literature (basic concepts). *Scientific Reports*, 13, 6289. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-33385-8>
- Vosti, S. A., y Reardon, T. (1997). *Sustainability, growth, and poverty alleviation: A policy and agroecological perspectives*. International Food Policy Research Institute. <http://cdm15738.contentdm.oclc.org/utills/getfile/collection/p15738coll2/id/126448/filename/126659.pdf>



# PARTE II

REFLEXIONES SOBRE LA AGENDA 2030  
Y LA ENERGÍA

# CAPÍTULO 7.

## RETOS PARA UNA TRANSICIÓN SOCIOENERGÉTICA: CASO CHIHUAHUA, MÉXICO

**Esmeralda Cervantes Rendón,<sup>1\*</sup> Gabriela Montano Armendáriz<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> Doctora en Investigación. Profesora de tiempo completo de El Colegio de Chihuahua. Correo electrónico: \*ecervantes@colech.edu.mx

<sup>2</sup> Doctora en Investigación. Docente de la Universidad Autónoma de Ciudad Juárez. Correo electrónico: gabriela.montano@uacj.mx

### Resumen

**E**n los últimos años el estudio de la energía con enfoque técnico y social ha incrementado su relevancia, sobre todo para lograr una transición energética como la establecida en la Agenda 2030 que lleve a disminuir las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI), con metas globales que tienen impacto en las decisiones de los gobiernos estatales. Por ello se toma como ejemplo el estado de Chihuahua, con el objetivo de identificar las consideraciones sociales y técnicas relacionadas con los ODS de la Agenda 2030 en las publicaciones académicas de acceso abierto sobre energía del estado de Chihuahua. Se realizó un análisis de contenido de 27 documentos académicos de acceso abierto seleccionados a través de una revisión sistemática de literatura. Se encontró que los ma-

yores problemas estudiados se relacionan con el uso de la energía eléctrica (52 %), el confort térmico residencial (17 %) y el uso de los residuos orgánicos (10 %). Desde lo técnico se le ha dado un mayor énfasis a la inversión y la diversificación de la matriz energética y desde lo social se ha considerado más la concientización y los hábitos de consumo. Se refleja la necesidad de incrementar grupos de investigación enfocados en la transición socioecológica desde abordajes multi- e interdisciplinarios.

Palabras clave: **Transición socioenergética; estado de Chihuahua; confort térmico; comunidades aisladas.**

---

## **Abstract**

In the last years the study of energy with a technical and social approach acquires greater relevance, especially to achieve an energy transition such as that established in the 2030 Agenda and thereby reduce greenhouse gas emissions, where despite being a global problem, they have an impact on the decisions of state governments, which is why the state of Chihuahua is taken as an example with the objective of identify social and technical considerations related to the SDGs of the 2030 Agenda in open access academic publications on energy from the state of Chihuahua. A content analysis was carried out on 27 open access academic documents selected through a systematic literature review. It was found that the biggest problems studied are related to the use of electrical energy (52 %), residential thermal comfort (17 %) and the use of organic waste (10 %). From a technical perspective, greater emphasis has been given to investment and diversification of the energy matrix, and from a social perspective, more awareness and consumption habits have been considered. The need to increase research groups focused on the socio-ecological transition from multi and interdisciplinary approaches is reflected.

Keywords: **Socio-energetics transition; Chihuahua State; thermal comfort; remote communities.**

## Introducción

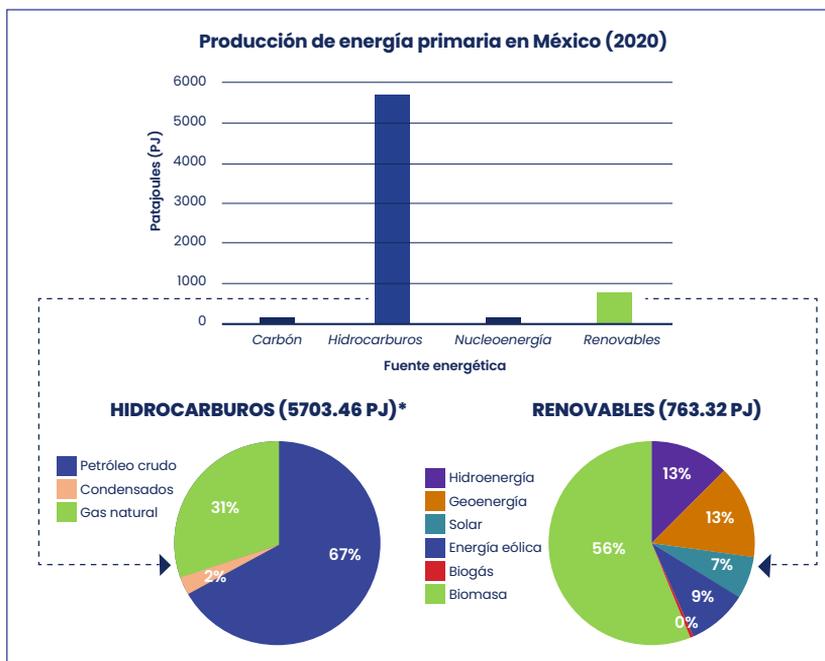
---

La energía juega un papel esencial en el planeta y su uso por la especie humana tiene un entramado de interacciones entre la sociedad, el ambiente y el cambio climático, siendo afectado tanto por los aspectos políticos y económicos como demográficos y geográficos. Su distribución y acceso puede generar desigualdades como las poblaciones remotas desconectadas de la red eléctrica y las familias que no pueden acceder a un confort térmico con eficiencia energética, así como su generación ocasiona impactos en los ecosistemas y en el planeta. El incremento tan acelerado en las últimas décadas de la generación de energía por combustibles fósiles ha ocasionado un fenómeno global como es el cambio climático (IPCC, 2023), lo que ha llevado a los países a buscar la colaboración para enfrentarlo, resultando recientemente en el Acuerdo de París llevado a cabo el 12 de diciembre de 2015, y la Agenda 2030 con 17 Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), que buscan el equilibrio entre lo social, lo ambiental, el desarrollo económico, lo institucional y lo climático (ONU, 2015).

De acuerdo con el Reporte de Cambio Climático 2023 del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC, por sus siglas en inglés), ya se tiene un cambio global de al menos 1.1 °C en el periodo 2011-2020 con respecto al periodo 1850-1900. Por ello es tan relevante la meta en el Acuerdo de París de solamente llegar a un incremento de temperatura global de 1.5 °C (IPCC, 2023).

La principal estrategia para lograr que el incremento global de temperatura no sea mayor a 1.5 °C es una transición energética que lleve del uso de los combustibles fósiles al consumo de energía renovable, que incluya el ahorro y almacenamiento energético, es decir, incrementar la matriz de las fuentes de energía. En el caso de México, durante el 2020 su matriz energética para la producción primaria estuvo distribuida entre los hidrocarburos (84 %), las energías renovables (11 %), el carbón (3 %) y la nucleenergía (2 %) (Figura 1).

**FIGURA 1.** Matriz energética de México durante el 2020



Fuente: Elaboración propia con datos obtenidos de Sener (2021).

Pero este esfuerzo no solamente requiere de nuevas inversiones y tecnologías, sino también de un cambio en las políticas, en la sociedad y en la economía, con una renovación del paradigma de cómo entendernos como especie humana transformadora de energía en un planeta que compartimos con otras especies, es decir, una transformación socioenergética.

Para lo anterior se requiere conocer las problemáticas y las estrategias desde diferentes actores, siendo uno de ellos la academia. Por ello, este trabajo tiene como objetivo identificar las consideraciones sociales y técnicas relacionadas con los ODS de la Agenda 2030 en las publicaciones académicas de acceso abierto sobre energía del estado de Chihuahua. El documento se divide en cuatro partes: 1) la transición socioenergética y la Agenda 2030; 2) retos para lograr una transición con una menor de-

pendencia de los hidrocarburos; 3) avances en el estado de Chihuahua para una transición socioenergética; y 4) los ODS en los estudios de energía del estado de Chihuahua y las conclusiones.

## **La transición socioenergética y la Agenda 2030**

---

En términos generales se considera transición energética al cambio de producción y generación de energía de combustibles fósiles a energías limpias y renovables, con el fin de lograr una disminución de las emisiones causantes del efecto invernadero, que se contabilizan por medio de la huella de carbono como dióxido de carbono equivalente (CO<sub>2</sub>e). Algunos ejemplos de esta energía utilizada en México son las hidroeléctricas, la geoenergía, la solar, la eólica, el biogás y la biomasa (Figura 1). Esta definición solamente se enfoca en el tema ambiental que considera que se deben tomar acciones por el cambio climático, pero de acuerdo con otros autores, la transición energética debe considerar otros factores como los sociales, políticos y económicos. Por ejemplo, Fornillo (2017) define una transición socioenergética como aquella que busca una soberanía energética por medio del diseño de estrategias que involucren a la sociedad y comunidades locales que logren una independencia energética, como lo es la generación de energía por la ciudadanía por medio de cooperativas, es decir, dejar de pensar en un sistema de control energético como sucede actualmente con los combustibles fósiles, y pensar en soluciones locales que logren proporcionar este recurso como un bien social apoyándose en las fuentes renovables y la eficiencia energética.

Bertinat (2016) enfatiza que la transición energética no es solamente la transición de combustibles fósiles a renovables, sino que implica un cambio cultural y complejo que incluye diversos factores como económicos, políticos, sociales, territoriales, tecnológicos y ambientales, entre otros, que deben ser considerados para poder cambiar del paradigma de visualizar la energía como una mercancía y llegar a verla como un derecho de los seres vivos, tanto del ser humano como de la naturaleza.

Sin embargo, esta transición socioenergética está muy alejada de la actual, en especial de países que han sido beneficiados con altas reservas de petróleo como es el caso de México, en donde los auges petroleros no necesariamente han sido acompañados de un desarrollo económico a largo plazo y que, al contrario, han generado una dependencia de las rentas petroleras (Kovacs, 2013).

Por otra parte, uno de los aspectos importantes de la aplicación de la Agenda 2030 es la interacción entre cada uno de sus objetivos, como es la relación del ODS 7: Garantizar el acceso a una energía asequible, segura, sostenible y moderna con el ODS 1: Fin de la pobreza, el ODS 2: Hambre cero, el ODS 3: Salud y bienestar, el ODS 4: Educación de calidad, el ODS 5: Igualdad de género, el ODS 6: Agua limpia y saneamiento, el ODS 8: Trabajo decente y crecimiento económico, el ODS 9: Industria, innovación e infraestructura; el ODS 10: Reducción de las desigualdades, el ODS 11: Ciudades y comunidades sostenibles, el ODS 12: Producción y consumo responsables, el ODS 13: Acción por el clima, el ODS 15: Vida de ecosistemas terrestres, el ODS 16: Paz, justicia e instituciones sólidas y el ODS 17: Alianzas para lograr los objetivos (ONU, 2018). En este caso, debido a que el estado de Chihuahua no se encuentra cercano a zonas marítimas, no se considera la interacción con el ODS 14: Vida submarina.

## **Retos para lograr una transición con una menor dependencia de los hidrocarburos**

En general se puede hablar de dos grandes retos para lograr una transición socioenergética: el primero es lograr, desde lo social, considerar a la energía como un derecho del ser vivo (Bertinat, 2016) y el segundo es, desde los aspectos técnicos, lograr una conversión energética enfocada al incremento del uso de energías renovables y eficiencia energética.

## **Retos para diseñar una estrategia social para la transición energética**

En los documentos oficiales no se ve claramente identificada la ruta que lleve a considerar los aspectos sociales para lograr este cambio de paradigma tanto desde las instituciones del Estado como desde la sociedad en general, y aquí entran varios retos que deben ser revisados y que se describen a continuación:

- **Poblaciones aisladas y problemas locales:** Dentro de los Planes Estatales de Cambio Climático se observa un avance en la identificación de estrategias para atender problemas locales, sin embargo, hace falta un mayor esfuerzo para resolver situaciones particulares por medio de la promoción de la autogestión (Fornillo, 2017) a través de los actores sociales que pueden brindar soluciones particulares (Bertinat, 2016).
- **Generación ciudadana y de cooperativas:** En este reto es importante considerar la participación tanto individual como de cooperativas conformadas por grupos afectados como pueden ser los agricultores, las organizaciones de la sociedad civil e incluso los comités de vecinos, que podrían diseñar estrategias para su consumo de energía y que como menciona Fornillo (2017), se logre una transición socioenergética desde sociedades autónomas y autoorganizadas.
- **Identificación temprana de posibles conflictos socioambientales por la implementación de proyectos energéticos:** Las energías provenientes de fuentes renovables como la solar, eólica e hidráulica tienen la ventaja ambiental de no generar CO<sub>2</sub> en su proceso de transformación, mientras que la energía proveniente de la biomasa busca generar emisiones neutras contribuyendo a su balance (Otterbach, 2013); sin embargo, aun con estas ventajas ambientales, se pueden ocasionar problemas socioambientales como los relacionados con la destrucción de la biodiversidad o que se presente una competencia por el acceso a un recurso natural, así como por cues-

tiones simbólicas para la población local (Paz, 2014), en especial cuando se genera un acceso y posesión de la tierra desigual ante nuevas tecnologías de explotación (Rubio, 2014), por lo que falta crear conciencia tanto en el gobierno como en desarrolladores de proyectos para que todos los grupos sociales se puedan ver beneficiados (Oswald, 2017).

- **Género y población vulnerable:** Pese a que en las estrategias y programas nacionales se menciona a la población vulnerable y la inclusión de género en los proyectos, es muy bajo el impacto que ha tenido esta inclusión. Por ejemplo, el Comité de Gestión por Competencias de Energía Renovable y Eficiencia Energética (CGCERE-REE),<sup>1</sup> que tiene como objetivo generar capital humano calificado en energía renovable y eficiencia energética por medio de estándares de competencia (EC), menciona que de las 1 130 personas certificadas solamente 119 fueron mujeres (Sener, 2017). Además, cuando se analizan la energía y la perspectiva de género es importante hacerlo de una manera contextualizada y multidimensional, revisando que se considere la sustentabilidad desde el uso equitativo de los bienes comunes (De Luca et al., 2018).
- **Concientización de la ciudadanía y de los tomadores de decisiones:** Aunque en los objetivos del Pronase<sup>2</sup> se considera el desarrollo de personal humano con capacitación técnica para la investigación, desarrollo tecnológico y la divulgación para el aprovechamiento sustentable de la energía (CONUEE, 2017), no

1 El CGCERE es una iniciativa de la Secretaría de Energía contemplada en el Programa Especial para Aprovechamiento de Energías Renovables 2014-2018. Está conformado por un comité de 40 miembros que provienen de la academia, el sector privado, el gobierno y organismos internacionales. <https://www.gob.mx/sener/documentos/comite-de-gestion-por-competencias-de-energia-renovable-y-eficiencia-energetica-35733>

2 El Programa Nacional para el Aprovechamiento Sustentable de la Energía (Pronase) 2014-2018, es el "instrumento del Ejecutivo federal mediante el cual se establecen objetivos, metas, estrategias y acciones que permitirán alcanzar el uso óptimo de la energía en todos los procesos y actividades de la cadena energética, desde la explotación hasta el uso final". <https://www.gob.mx/conuee/acciones-y-programas/programa-nacional-para-el-aprovechamiento-sustentable-de-la-energia-pronase-2014-2018>

se debe dejar de lado a los tomadores de decisiones y a la ciudadanía en general. A los primeros para que continúen apoyando el desarrollo de estrategias bajas en carbono y a los segundos para que se pueda llegar a una transición socioenergética (Fornillo, 2017) que genere una ciudadanía informada capaz de tomar decisiones y participar activamente en esta transición.

### **Retos para diseñar una estrategia técnica de conversión energética**

Para un desarrollo tecnológico bajo en emisiones de GEI es necesario considerar los siguientes retos:

1. Formación de recurso humano: Enfocado en el personal técnico y científico.
2. Inversión privada y pública: Enfocada al desarrollo tecnológico apoyada por la academia para el desarrollo de fondos y fideicomisos con aplicación de proyectos con beneficio para la población.
3. Colaboración internacional para el aprendizaje de otras experiencias que han sido probadas y exitosas: Las experiencias de países desarrollados son de vital importancia para llevar a cabo un camino más eficiente y eficaz, de ahí la importancia de mantener los acuerdos.

## **Avances en el estado de Chihuahua para una transición socioecológica con respecto a la energía**

---

El 4 de septiembre de 2021 se otorgaron mediante decreto<sup>3</sup> atribuciones a la Secretaría de Innovación y Desarrollo Económico para coor-

---

<sup>3</sup> Decreto No. LXVI/RFLEY/1057/2021 XIV P.E. publicado por el Congreso del Estado de Chihuahua.

dinar la Estrategia Estatal de Desarrollo Energético Sustentable con el objetivo de promover la competitividad y la inversión pública, social y privada mediante la Agencia Estatal de Desarrollo Energético, cuya función es promover el ahorro y uso eficiente de la energía por medio de la consolidación de la demanda de recursos públicos enfocados a la adquisición de insumos energéticos, así como impulsar esquemas de financiamiento para la innovación, desarrollo tecnológico y generación de capital humano en materia de energía.

El 8 de junio de 2023 fue constituido el Consejo Consultivo de Desarrollo de Energía, cuya función es ser una plataforma de opinión, así como un medio para consultar y proponer el diseño de iniciativas que apoyen el crecimiento económico del estado. Dicho consejo está presidido por expertos en la materia, sector público, privado y académico de los municipios de Juárez, Chihuahua, Cuauhtémoc, Casas Grandes y Delicias (Gobierno del Estado de Chihuahua, 2022). Mientras que, en cuestión de inversión, el 20 de septiembre de 2023 se creó el Fideicomiso para el Desarrollo Energético Sustentable del Estado de Chihuahua.

En cuanto a los avances estatales sobre la generación de políticas y programas ante el cambio climático y en materia de transición energética cuyo objetivo ha sido el de impulsar iniciativas que reduzcan las emisiones de gases de efecto invernadero con medidas de mitigación y adaptación, podemos encontrar los siguientes (INECC, 2020):

- Evaluación de la Política Estatal de Cambio Climático.
- Plan Estatal de Desarrollo 2017-2021.
- Ley de Cambio Climático del Estado de Chihuahua.
- Programa Estatal de Cambio Climático de Chihuahua.
- Comisión Intersecretarial de Cambio Climático del Estado de Chihuahua.

Aun cuando se cuenta con el desarrollo de las acciones y documentos anteriores, todavía falta camino por avanzar, ya que no se ha cumplido con el Reglamento de Cambio Climático ni con el Fondo Estatal de Cambio Climático (INECC, 2020).

Una arista importante para el desarrollo de estas políticas estatales es la aportación de la academia, no solamente desde el conocimiento científico, sino desde su colaboración con la sociedad y el gobierno. Por ello, para identificar el avance del estado de Chihuahua, se analizó la forma en que desde la investigación científica han sido considerados los aspectos sociales y técnicos en las publicaciones de energía.

Para ello se realizó una búsqueda de publicaciones académicas sobre este tema en el estado de Chihuahua del periodo 2012-2022 en repositorios de acceso abierto como SciELO, Redalyc y el buscador Google Académico, para lo cual se utilizaron los términos derivados del Tesauro General Multilingüe Ambiental (GEMET,<sup>4</sup> por sus siglas en inglés), destacando los términos de búsqueda “ahorro energético”, “energía eólica”, “energía solar”, “energía de la biomasa” y “energía basada en el petróleo” más el término “Chihuahua”. La selección de los términos se realizó con base en las características de su potencial energético.

Del total de búsquedas se seleccionaron 27 publicaciones que cumplieron con los criterios de calidad, siendo en su mayoría artículos científicos (51.7 %), seguidos de memorias de congreso en extenso (20.7 %), capítulos de libro (13.8 %) y en muy baja proporción los libros y ensayos con 6.9 % cada uno (Tabla 1).

El análisis de los documentos se realizó desde dos vertientes: la primera, un análisis bibliométrico donde se identificó la problemática estudiada, la propuesta de solución, el sector económico sobre el que se realizó el estudio, el tipo de documento, los municipios estudiados y el año de publicación. Dentro de los sectores económicos se identificaron el ga-

---

4 El tesauro GEMET puede ser consultado en <https://www.eionet.europa.eu/gemet/es/themes/>

nadero, el agrícola, el minero, el rural, el industrial, el urbano y el universitario (Tabla 1). Mientras que el segundo análisis fue una interpretación de los retos técnicos y sociales que se mencionaron en los documentos por medio de su codificación (Casasempere-Satorres y Vercher-Ferrándiz, 2020), con el apoyo de la herramienta analítica NVivo, generando mapas jerárquicos con la densidad de codificación.

**TABLA 1.** Tipo de documentos académicos revisados, de acceso abierto para el análisis de la literatura del tema de energía en el estado de Chihuahua

Tipo de documento	Ganadero	Agrícola	Acuícola	Minero	Rural	Industrial	Urbano	Universitario	TOTAL
Artículo	1	4	1	0	1	1	4	3	15
Memorias en extenso	0	0	0	1	0	0	4	1	6
Libro	0	2	0	0	0	0	0	0	2
Capítulo de libro	0	1	0	0	0	1	1	1	4
Ensayo	0	0	0	0	1	0	1	0	2
<b>TOTAL</b>	<b>1</b>	<b>7</b>	<b>1</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>2</b>	<b>10</b>	<b>5</b>	
<b>PORCENTAJE</b>	<b>3 %</b>	<b>24 %</b>	<b>3 %</b>	<b>3 %</b>	<b>7 %</b>	<b>7 %</b>	<b>34 %</b>	<b>17 %</b>	

Fuente: Elaboración propia con base en los documentos seleccionados de acceso abierto.

Nota: La cantidad de documentos es de 27, sin embargo, debido a que un ensayo y un artículo abordan dos sectores diferentes, el total en esta tabla es de 29.

Del análisis de publicaciones académicas del estado de Chihuahua sobresale que la mayoría son para el sector urbano (34 %), seguido del agrícola (24 %), con una cantidad considerable de estudios sobre espacios universitarios (17 %) (Tabla 1). En cuestión de municipios se identificó que fueron realizados principalmente sobre Juárez y Chihuahua, así como de las regiones agrícolas de Cuauhtémoc y Delicias (Tabla 2).

En la categoría de las problemáticas estudiadas se identificaron el uso de la energía, el confort térmico residencial, el costo

**TABLA 2.** Distribución del municipio sobre el que se realizó el estudio

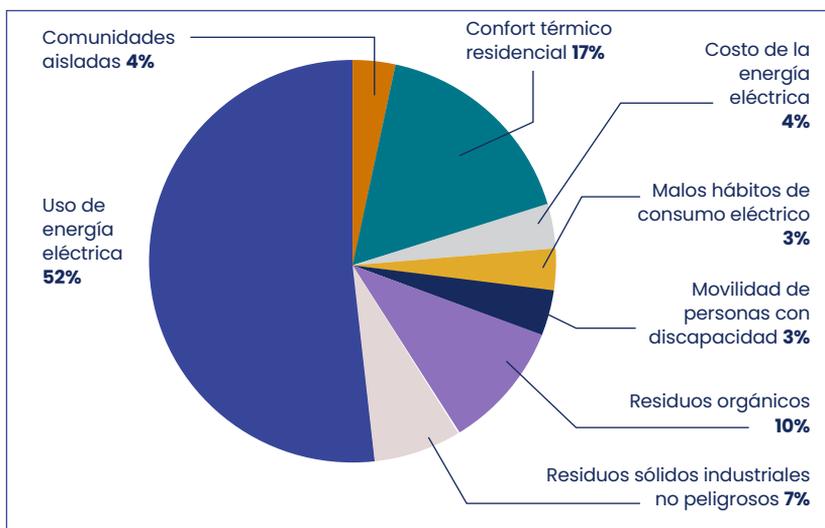
Municipio	Cantidad
Delicias	2
Rosales	1
Meoqui	1
Saucillo	1
Balleza	1
Cuauhtémoc	3
Juárez	10
Chihuahua	5
Guachochi	1
Estatad	5
<b>TOTAL</b>	<b>30</b>

Fuente: Elaboración propia. Nota: La cantidad es mayor a 27 debido a que en algunos documentos se hablaba de más de un municipio.

de la energía eléctrica, malos hábitos de consumo, movilidad de personas con discapacidad, residuos sólidos industriales no peligrosos, comunidades aisladas y la generación de residuos orgánicos (Figura 2).

En el caso de los estudios sobre uso de la energía desde el sector residencial se consideró el análisis de costo-beneficio (Armendáriz, 2017), así como la percepción del ciudadano para implementar sistemas fotovoltaicos en sus hogares a fin de contribuir en disminuir la pobreza energética (Peña y Herrera, 2021), además de incluir pruebas para sistema híbrido de enfriamiento evaporativo para viviendas (Sosa et al., 2020). Estos dos últimos son ejemplos en donde es considerada la necesidad del confort térmico, el cual también fue abordado desde estudios de materiales de construcción con alta resistencia térmica (Herrera, 2017), la climatización pasiva en vivienda social (Alba et al., 2021) y el uso de simuladores energéticos para identificar las mejores medidas para incrementar dicho confort (Lucero et al., 2022).

**FIGURA 2.** Problemáticas estudiadas en las investigaciones de energía del estado de Chihuahua, periodo 2012-2022



Fuente: Elaboración propia. El total de problemáticas es de 30, debido a que en algunos documentos se tiene más de una problemática.

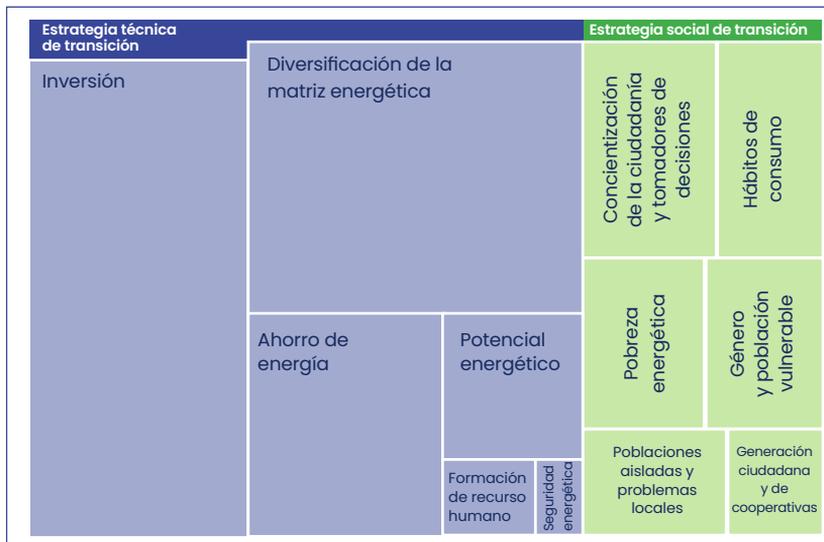
En el sector agrícola se incluyeron estudios para identificar la factibilidad técnica y social para el cambio de sistemas de bombeo convencionales por solares (Cervantes, 2017; J. E. Hernández et al., 2019; Nevárez y Sígala, 2020), así como la producción de biocombustibles con residuos orgánicos de la producción de manzana (Yáñez et al., 2016; Baray et al., 2020). De estos últimos también han sido considerados los residuos orgánicos para la generación de biogás desde el sector ganadero (Rivas et al., 2012).

Por su parte, en el sector universitario se han realizado investigaciones sobre el cálculo para un sistema solar para la carga de dispositivos móviles (Ramírez et al., 2016), el monitoreo y ayudas visuales para el control del consumo y reducción del uso de energía (M. G. Hernández et al., 2019) y el análisis de la factibilidad del uso de paneles solares en los centros universitarios (Arroyo et al., 2021).

En el caso del sector industrial se ha considerado la evaluación económica del uso de un sistema interconectado a la red comparado con un sistema fotovoltaico en una minera (Olivas et al., 2017), así como la aplicación en la industria cementera de residuos sólidos industriales no peligrosos como combustibles (Luna et al., 2019; Solís et al., 2019).

Ahora, considerando los elementos de una transición socioenergética, dentro de las publicaciones académicas de acceso abierto del estado de Chihuahua se identificó que tienen un mayor peso el abordaje de los aspectos técnicos desde la inversión y la diversificación de la matriz energética, mientras que desde los aspectos sociales se enfocan mayormente en la concientización y los hábitos de consumo (Figura 3).

**FIGURA 3.** Mapa jerárquico del número de referencias de codificación de los documentos de energía del estado de Chihuahua



Fuente: Elaboración propia.

### Retos técnicos considerados desde los estudios académicos para el estado de Chihuahua

Los retos técnicos identificados previamente en la sección de antecedentes consideraron la inversión, la formación de recurso humano y la colaboración internacional para el aprendizaje. Desde las publicaciones académicas del estado de Chihuahua se identificó la aplicación de estos retos de la siguiente manera:

- **Inversión:** De las 27 publicaciones académicas, 20 consideraron la inversión como un elemento para la toma de decisión en el cambio de energía, en el material de construcción, el ahorro energético o en desarrollo de adecuaciones que permitieran una mayor eficiencia en los sistemas alternativos.

- **Formación de recurso humano:** En el caso de los estudios enfocados en ambientes universitarios, fue importante la inclusión de estudiantes para su desarrollo (Solís et al., 2019; Arroyo et al., 2021). Esta es una área de oportunidad, ya que al revisar las ofertas académicas de las instituciones pertenecientes al Consorcio de Instituciones de Educación Superior Paso del Norte (CIESPN), de las 17 registradas solamente tres tienen la carrera de Ingeniería en Energías Renovables: el Instituto Tecnológico de Delicias, la Universidad Tecnológica de Ciudad Juárez y la Universidad Tecnológica de Chihuahua.
- **Colaboración internacional para el aprendizaje de otras experiencias que han sido probadas y exitosas:** En los documentos no se habló de estas colaboraciones y al determinar la institución de adscripción de los autores no se identificaron instituciones fuera de México, siendo el 95 % de corte estatal, lo que refleja la necesidad de búsqueda para incluir programas de intercambio o proyectos de colaboración con instituciones fuera del país y con experiencias previas en las problemáticas particulares que se enfrentan en el estado de Chihuahua.

De la revisión de contenido surgieron nuevas categorías de análisis, destacando la diversificación de la matriz energética, el ahorro de energía, el potencial y la seguridad energética (Figura 3). Dentro de estas categorías se identificó que hablan sobre el potencial de energía solar con el que cuenta el estado de Chihuahua (Chávez et al., 2022), mientras que sobre el tema de la diversificación de la matriz energética se ha trabajado desde la consideración de la energía solar, la eólica, los residuos orgánicos y los residuos industriales no peligrosos, ambos como biocombustibles.

### **Retos sociales considerados desde los estudios académicos para el estado de Chihuahua**

- **Generación ciudadana y de cooperativas:** Este reto solamente se abordó en dos estudios, uno donde se diseña un sistema híbrido

solar y eólico con almacenamiento de energía por medio de baterías (Ponce, 2014) y en otro como propuesta para comunidades pequeñas de agricultores (Hernández et al., 2019).

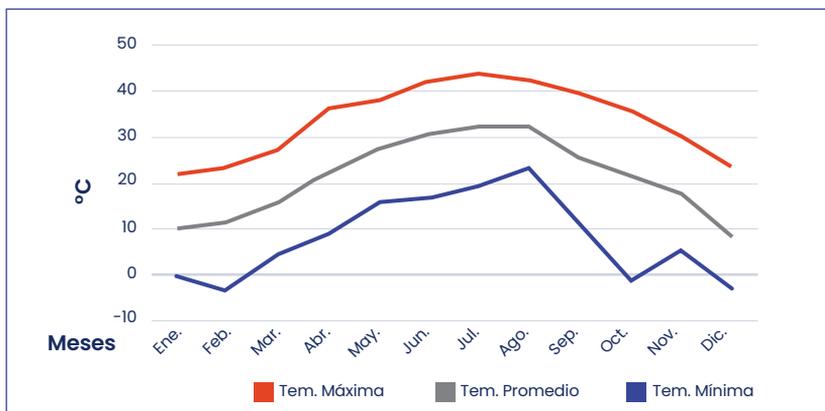
- Poblaciones aisladas y problemas locales: Esta categoría se relaciona directamente con la anterior, ya que al tener comunidades aisladas en el estado es importante considerar sus problemáticas con soluciones locales. En ese sentido, además del sistema híbrido mencionado arriba, también se trabajó en la propuesta para el uso de energía fotovoltaica para una granja acuícola (Villalobos et al., 2017). Sin embargo, falta mucho trabajo por hacer, sobre todo en la región de la Sierra Tarahumara, donde se encuentra gran parte de la población indígena del estado en municipios que cuentan con una cifra menor al 88 % de viviendas con electricidad, siendo estos Batopilas (49.8 %), Maguarichi (66.2 %), Urique (66.3 %), Guadalupe y Calvo (72 %), Uruachi (74 %), Guachochi (75 %), Balleza (76.4 %), Morelos (76.8 %), Chínipas (80 %), Carichí (82.6 %), Guazapares (85.1 %) y Bocoyna (88 %) (INEGI, 2020).
- Identificación temprana de posibles conflictos socioambientales por la implementación de proyectos energéticos: De los estudios analizados no se encontraron situaciones de conflictos socioambientales; sin embargo, en el Atlas de Justicia Ambiental se tiene el registro de un conflicto relacionado con protestas por el uso de la técnica del *fracking* para la extracción de gas, esto en la fase de exploración durante el 2014 (EJ Atlas, 2023).
- Género y población vulnerable: En cuestión de género no se identificaron estudios que consideren la perspectiva de género en el desarrollo de proyectos o para la identificación de problemáticas, pero como un panorama general que permite observar el involucramiento de las mujeres en los estudios de energía, se contabilizaron los autores de los documentos analizados y se encontró que 41 % son mujeres, lo que representa un acercamiento

de ellas hacia el tema de la energía. Por otra parte, sobre la población vulnerable, además de las comunidades aisladas también se estudió la movilidad de personas con discapacidad considerando el transporte público (Pereira et al., 2022). Sin embargo, falta trabajar más con las comunidades ubicadas en la Sierra Tarahumara, ya que del estado son las que tienen una vulnerabilidad de media a alta ante el cambio climático, concentrándose aún más en hogares con jefatura femenina y con pobreza alimentaria e indígenas, sobre todo en los municipios de Batopilas, Urique, Carichí, Morelos y Maguarichi (Monterroso et al., 2014).

- **Concientización de la ciudadanía y de los tomadores de decisiones:** Destaca la concientización a los estudiantes, personal académico y administrativo en los estudios realizados en las universidades (J. E. Hernández et al., 2019; Arroyo et al., 2021), así como a la ciudadanía con el fin de lograr un cambio hacia sistemas fotovoltaicos, ahorro energético que incluye la inversión en electrodomésticos eficientes, considerando que los programas de apoyo para los hogares de escasos recursos también incluyan la concientización de los usuarios (Peña y Herrera, 2021).

Del análisis de contenido surgieron nuevas categorías, tales como los hábitos de consumo relacionados con la necesidad de concientización y el ahorro energético, así como la pobreza energética (Figura 3), definida como la situación en que se encuentra un hogar que destina más del 10 % de su ingreso a pagos de servicios energéticos (Boardman, 1991, como se cita en García-Ochoa y Graizbord, 2016). Aquí destaca uno de los elementos prioritarios de las viviendas en el estado: el mantenimiento del confort térmico, sobre todo en regiones donde se tienen temperaturas extremas tanto en el verano como en el invierno. En ese sentido, tomando Ciudad Juárez como ejemplo y el 2020 como un año regular en el que no hubo eventos climáticos atípicos, observamos las diferencias que se pueden tener en los meses con temperaturas altas que pueden llegar hasta los 44 °C y mínimas de hasta los -3 °C (Figura 4).

**FIGURA 4.** Gráfica de temperaturas máximas, mínimas y promedio en Ciudad Juárez, durante el 2020



Fuente: Elaboración propia con datos de la estación meteorológica de El Colegio de Chihuahua.

Con lo anterior destaca que para caracterizar la pobreza energética en el estado es necesario considerar dentro de las necesidades energéticas del hogar el lograr mantener temperaturas de confort en las viviendas y enfocar medidas de inversión para disminuir el gasto familiar dedicado para ello durante prácticamente todo el año.

## Los ODS en los estudios de energía del estado de Chihuahua

Del análisis de contenido destaca un avance en el cumplimiento de la elaboración de planes y programas estatales, sin embargo, todavía falta camino por recorrer, sobre todo para las rutas de implementación de las estrategias diseñadas en sus programas, considerando las alianzas con otras instituciones de corte nacional e internacional (ODS 17: Alianzas para lograr los objetivos).

Sobre los trabajos de investigación revisados, resalta la importancia de considerar las medidas para una transición socioenergética desde los

estados, como el caso de Chihuahua, resultando evidente las diferentes características de sus regiones y sectores económicos. Por ejemplo, desde el sector agrícola el interés va hacia el reemplazo de energía convencional por energía fotovoltaica para el bombeo, así como el uso de residuos orgánicos como biocombustibles (ODS 12: Producción y consumo responsables), ambas situaciones relacionadas con la competitividad del sector (ODS 1: Fin de la pobreza, ODS 8: Trabajo decente y crecimiento económico), así como la contribución para eliminar el hambre (ODS 2: Hambre cero), mientras que en las regiones urbano-residenciales la principal preocupación energética es sobre el confort térmico (ODS 7: Energía asequible y no contaminante), incluida la vivienda social para población que no tiene el recurso para hacer inversiones de este tipo (ODS 10: Reducción de las desigualdades) y la concientización de los ciudadanos para el cambio en los hábitos de consumo y uso de otro tipo de energías y materiales de construcción (ODS 11: Ciudades y comunidades sostenibles).

Con relación a la industria, aunque se identifican algunos esfuerzos por considerar las energías renovables dentro de sus procesos, no se observa una fuerte vinculación con la academia para lograr una transición energética (ODS 9: Industria innovación e infraestructura).

Por otra parte, se identificó que la universidad funge un rol importante de concientización a los estudiantes (ODS 4: Educación de calidad), sin embargo, solamente se cuenta con tres programas de Ingeniería en Energías Renovables, lo que muestra el rezago en la promoción de la educación y formación de personal técnico capacitado en este tema. Esto también se refleja en la poca cantidad de publicaciones académicas y la falta de colaboraciones con otras instituciones ya que al no tener programas específicos sobre energías renovables, menos grupos de investigadores se enfocan en ese tema, y aquí destaca la necesidad de que estos sean con un perfil multi- e interdisciplinario, ya que las investigaciones que existen tienen un mayor enfoque hacia los aspectos técnicos que los sociales, y para lograr la transición socioenergética es necesario un abordaje desde las diversas disciplinas.

Desde los aspectos sociales se vio poco acercamiento a los temas de generación ciudadana y de cooperativas, sobre todo para poblaciones aisladas y con alta vulnerabilidad (ODS 10: Reducción de las desigualdades), como es el caso de los municipios de Batopilas (49.8 % de viviendas con electricidad), Urique (66.3 % de viviendas con electricidad), Carichí (82.6 % de viviendas con electricidad), Morelos (76.8 % de viviendas con electricidad) y Maguarichi (66.2 % de viviendas con electricidad). No se encontraron estudios que trabajen directamente en estos municipios, lo que muestra la necesidad de acercarse a sus problemáticas.

Aunado a las desigualdades encontradas en los municipios mencionados, también se ha identificado que un elemento que incrementa la vulnerabilidad de estas poblaciones es que se tiene un alto número de hogares con jefatura femenina, por lo que es necesario considerar el enfoque de género (ODS 5: Igualdad de género).

## **Conclusiones**

Se realizó una revisión sistemática de literatura y un análisis de contenido para identificar las consideraciones sociales y técnicas relacionadas con los ODS en las publicaciones académicas de acceso abierto del estado de Chihuahua del periodo 2012-2022. En la revisión de literatura se identificó la problemática estudiada, la propuesta de solución, el sector económico sobre el que se realizó el estudio, el tipo de documento, los municipios estudiados y el año de publicación. Las principales problemáticas sobre la energía identificadas en las publicaciones fueron sobre su uso (52 %), el confort térmico residencial (17 %), el costo de la energía (4 %), malos hábitos de consumo energético (3 %), la movilidad de personas con discapacidad (3 %), el uso energético de los residuos industriales no peligrosos (7 %), las necesidades de las comunidades aisladas (4 %) y la generación de residuos orgánicos y uso como combustibles (10 %).

En el análisis de contenido se identificaron los retos para una transición socioecológica de la energía para compararlos con los estudios del

estado, esto por medio de la generación de categorías de análisis que se interpretaron en los textos. Se encontró que en los estudios académicos se tiene una mayor consideración sobre los retos técnicos que los sociales para lograr una transición socioenergética (Figura 3).

Los retos sociales identificados incluyeron: 1) poblaciones aisladas y problemas locales; 2) generación ciudadana y de cooperativas; 3) identificación temprana de posibles conflictos socioambientales para la implementación de proyectos energéticos; 4) género y población vulnerable; y 5) concientización de la ciudadanía y de los tomadores de decisiones. Se observó un mayor trabajo en la consideración de las poblaciones aisladas y la generación de energía por la ciudadanía, sobre todo para pequeños agricultores y pequeñas localidades, sin embargo, falta mucho trabajo por hacer sobre todo con las poblaciones de la Sierra Tarahumara que tienen un nivel de medio a alto de vulnerabilidad ante el cambio climático. En cuestión de la concientización se identificó que la universidad juega un rol importante al involucrar a los estudiantes en proyectos relacionados con la transición socioenergética. Del análisis de contenido de los documentos del estado surgieron otros retos, como los hábitos de consumo y la pobreza energética, sobre todo considerando el confort térmico de los hogares.

Desde lo técnico se identificaron los siguientes retos: 1) formación de recurso humano; 2) inversión privada y pública; y 3) colaboración internacional para el aprendizaje de otras experiencias que han sido probadas y exitosas. Todos estos elementos fueron considerados en las publicaciones del estado de Chihuahua, sobre todo el reto de la inversión para lograr el cambio de la fuente energética, el uso de materiales térmicos en la construcción habitacional, la adquisición de equipo que otorgue un ahorro energético y el desarrollo de adecuaciones que incrementen la eficiencia de los sistemas. Pero se observó que falta un largo camino por recorrer en cuestión de educación y colaboración internacional, ya que solamente se tienen tres programas educativos relacionados con las energías renovables y en los estudios revisados el 95 % son autores de institu-

ciones estatales. Por otra parte, del análisis de los textos del estado surgieron los retos relacionados con la matriz energética, el ahorro de energía, el potencial y seguridad energética.

Un aspecto importante para considerar cuando se estudia la Agenda 2030 para una transición socioenergética es que los ODS se interrelacionan, lo que se observa en la interpretación que se dio de los textos académicos, que aun cuando solamente hablan sobre la energía se pudo identificar la relación que tienen con los otros ODS. Por ello, el estudiar la transición socioenergética desde la academia requiere de esfuerzos y colaboraciones entre las ciencias sociales y exactas, así como la vinculación con los sectores de gobierno, industria, agrícola y social, con el fin de lograr esta transición considerando el entorno social, ambiental, económico y técnico.

Este trabajo presenta una fracción desde la academia del panorama general que incluye aspectos sociales y técnicos de la Agenda 2030 con relación a una transición socioenergética en una región plural como es el estado de Chihuahua.

## REFERENCIAS

- Alba, L. K., Herrera, L. C., y Esparza, C. J. (2021). Análisis de costo-beneficio de estrategias de climatización pasiva en vivienda social en Ciudad Juárez, Chihuahua. *Vivienda y comunidades sustentables*, 5(10), 81-91. <https://doi.org/10.32870/rvcs.v2i10.165>
- Armendáriz, J. F. (2017). *Costo-beneficio de sistemas fotovoltaicos en el sector residencial en la ciudad de Chihuahua* [Ponencia]. 9º Congreso Internacional de Investigación Científica y Multidisciplinaria, Chihuahua, México. [https://www.researchgate.net/publication/322784870\\_Costo-Beneficio\\_de\\_Sistemas\\_Fotovoltaicos\\_en\\_el\\_Sector\\_Residencial\\_en\\_la\\_Ciudad\\_de\\_Chihuahua](https://www.researchgate.net/publication/322784870_Costo-Beneficio_de_Sistemas_Fotovoltaicos_en_el_Sector_Residencial_en_la_Ciudad_de_Chihuahua)
- Arroyo, J. R., Alvidrez, M. R. F., Arizmendi, A. E., Domínguez, V. A., Fraire, M., y Viramontes, O. A. (2021). Uso de energía sostenible como principio de una administración responsable. En L. Miranda y M. A. Santinelli (Coords.), *Responsabilidad social y sostenibilidad: disrupción e innovación ante el cambio de época* (pp. 258-273). Universidad Autónoma de Chihuahua.
- Baray, M. del R., Valles, M. C., Nevárez, M. C., y Manjarrez, C. B. (2020). Determinación de los parámetros cinéticos de la pirolisis de la biomasa lignocelulósica. *Revista de Energías Renovables*, 4(13), 18-25. [https://www.ecorfan.org/republicoperu/research\\_journals/Revista\\_de\\_Energias\\_Renovables/vol4num13/Revista\\_de\\_Energ%C3%ADas\\_Renovables\\_V4\\_N13\\_3.pdf](https://www.ecorfan.org/republicoperu/research_journals/Revista_de_Energias_Renovables/vol4num13/Revista_de_Energ%C3%ADas_Renovables_V4_N13_3.pdf)
- Bertinat, P. (2016). *Transición energética justa. Pensando la democratización energética*. Friedrich Ebert Stiftung.
- Casasempere-Satorres, A., y Vercher-Ferrándiz, M. L. (2020). Análisis documental bibliográfico. Obteniendo el máximo rendimiento a la revisión de la literatura en investigaciones cualitativas. En F. Freitas, I. Pinho, A. I. Rodrigues, B. M. Faria y A. P. Costa (Eds.), *Investigación cualitativa en Ciencias Sociales. Avances y desafíos* (pp. 247-257). <https://doi.org/10.36367/ntqr.4.2020.247-257>

- Cervantes, E. (2017). *El Valle de Juárez: su historia, economía y ambiente para el uso de energía fotovoltaica*. El Colegio de Chihuahua. <http://www.colech.edu.mx/cont/valledejuarez.pdf>
- Chávez, P. A., Torres, E. A., y Flores, O. I. (2022). Energías renovables en el estado de Chihuahua. *Hitos de Ciencias Económico Administrativas*, 28(80), 126-138. <https://doi.org/10.19136/hitos.a28n80.4973>
- Comisión Nacional para el Uso Eficiente de la Energía. (2017). *Actualización del Programa Nacional para el Aprovechamiento Sustentable de la Energía (Pronase) 2014-2018*. CONUEE. [https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/185047/PRONASE2016OdB04112016concomentariosCCTE\\_0812116CS-VersionFinalcomprimida.pdf](https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/185047/PRONASE2016OdB04112016concomentariosCCTE_0812116CS-VersionFinalcomprimida.pdf)
- De Luca, A., Vázquez, V., Bose, P., y Velázquez, M. (2018). Introducción. En A. de Luca, V. Vázquez, P. Bose y M. Velázquez (Coords.), *Género, energía y sustentabilidad. Aproximaciones desde la Academia* (pp. 9-19). <https://doi.org/10.22201/crim.9786073009997e.2018>
- EJ Atlas. (2023). *Resistance to fracking in Chihuahua, Mexico*. Global Atlas of Environmental Justice. <https://ejatlas.org/conflict/resistance-to-fracking-in-chihuahua-mexico>
- El Heraldo de Chihuahua. (2023, 3 de mayo). *Potenciamos las energías del futuro en sintonía con un mundo globalizado*. <https://www.pressreader.com/mexico/el-heraldo-de-chihuahua/20230305/283412015908224>
- Fornillo, B. (2017). Hacia una definición de transición energética para Sudamérica: antropoceno, geopolítica y posdesarrollo. *Prácticas de oficio*, 2(20), 46-53. <http://hdl.handle.net/11336/74210>
- García-Ochoa, R., y Graizbord, B. (2016). Caracterización espacial de la pobreza energética en México. Un análisis a escala subnacional. *Economía, Sociedad y Territorio*, 16(51), 289-337. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=11145317002>
- Gobierno del Estado de Chihuahua. (2022). *Gobernadora Maru Campos toma protesta a integrantes del nuevo Consejo Consultivo de Desarrollo Energético*. Gobierno del Estado de Chihuahua. <https://chihuahua.gob.mx/prensa/gobernadora-maru-campos-toma-protesta-integrantes-del-nuevo-consejo-consultivo-de-desarrollo>

- Hernández, J. E., Márquez, W., Pérez, J. A., y Macías, M. G. (2019). Factibilidad financiera de infraestructura solar para pequeños y medianos agricultores y productores de nuez en Delicias, Chihuahua. *Revista Iberoamericana de las Ciencias Biológicas y Agropecuarias*, 8(16), 131-151. <https://doi.org/10.23913/ciba.v8i16.94>
- Hernández, M. G., Ortega, L. A., Ruiz, I. J., y Caro, I. S. (2019). Control operacional para reducción de consumo de energía eléctrica en el Instituto Tecnológico de Chihuahua II. *Revista de Aplicaciones de la Ingeniería*, 6(21), 24-33. [https://www.ecorfan.org/bolivia/researchjournals/Aplicaciones\\_de\\_la\\_Ingenieria/vol6num21/Revista\\_de\\_Aplicaciones\\_de\\_la\\_Ingenier%C3%ADa\\_V6\\_N21.pdf](https://www.ecorfan.org/bolivia/researchjournals/Aplicaciones_de_la_Ingenieria/vol6num21/Revista_de_Aplicaciones_de_la_Ingenier%C3%ADa_V6_N21.pdf)
- Herrera, L. C. (2017). Evaluación térmica del material Isoblock en el clima cálido seco de Ciudad Juárez, México. *Revista Hábitat Saludable*, 7(2), 18-27. <https://doi.org/10.22320/07190700.2017.07.02.02>
- Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático. (2020). *Instrumentos de política climática por estado (Chihuahua)*. INECC. [https://cambioclimatico.gob.mx/estadosmunicipios/EI\\_08.html](https://cambioclimatico.gob.mx/estadosmunicipios/EI_08.html)
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía. (2020). *Censo de población y vivienda 2020*. INEGI. <https://www.inegi.org.mx/>
- Intergovernmental Panel on Climate Change. (2023). Summary for policymakers. En The Core Writing Team, H. Lee y J. Romero (Eds.), *Climate change 2023: Synthesis report. A Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (pp. 1-34). IPCC. [https://www.ipcc.ch/report/ar6/syr/downloads/report/IPCC\\_AR6\\_SYR\\_SPM.pdf](https://www.ipcc.ch/report/ar6/syr/downloads/report/IPCC_AR6_SYR_SPM.pdf)
- Kovacs, T. (2013). Auges petroleros en México: sucesos fugaces. *Economía UNAM*, 10(29), 35-55. <https://www.scielo.org.mx/pdf/eunam/v10n29/v10n29a3.pdf>
- Lucero, J., Hernández, N. S., y Estrada, J. A. (2022). Aplicaciones de la modelación energética de edificaciones: revisión y casos de estudio en México. *Vivienda y comunidades sustentables*, 6(12), 55-80. <https://doi.org/10.32870/rvcs.v0i12.213>
- Luna, A., Lozoya, L. A., y González, G. (2019). Potencial de residuos industriales generados en Ciudad Juárez, Chihuahua, México, como combustibles alternos en un horno cementero. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 35(3), 713-722. <https://doi.org/10.20937/RICA.2019.35.03.16>

- Monterroso, A., Fernández, A., Trejo, R. M., Conde, A. C., Escandón, J., Villers, L., y Gay, C. (2014). *Vulnerabilidad y adaptación a los efectos del cambio climático en México*. Centro de Ciencias de la Atmósfera. Programa de Investigación en Cambio Climático, Universidad Nacional Autónoma de México. <http://at-lasclimatico.unam.mx/VyA>
- Nevárez, M. C., y Sígala, M. A., (2020). Energía solar para el desarrollo sustentable del estado de Chihuahua. En S. de la Vega, R. E. Rózga y G. del C. Hoyos (Coords.), *Factores críticos y estratégicos en la interacción territorial. Desafíos actuales y escenarios futuros. Volumen III* (pp. 691-698). <https://ru.iiec.unam.mx/5247/1/3-098-Nevarez-Sigala.pdf>
- Olivas, J. N., Amaya, R. M., García, M. P., y Escárcega, N. (2017). *Evaluación de alternativas para el suministro de energía en una empresa del sector minero en el estado de Chihuahua* [Ponencia]. 9º Congreso Internacional de Investigación Científica y Multidisciplinaria, Chihuahua, México.
- Organización de las Naciones Unidas. (2015). *La Asamblea General adopta la Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible*. ONU. <https://www.un.org/sustainable-development/es/2015/09/la-asamblea-general-adopta-la-agenda-2030-para-el-desarrollo-sostenible/#>
- Organización de las Naciones Unidas. (2018). *La Agenda 2030 y los Objetivos de Desarrollo Sostenible: una oportunidad para América Latina y el Caribe*. ONU. <https://repositorio.cepal.org/server/api/core/bitstreams/cb30a4de-7d87-4e79-8e7a-ad5279038718/content>
- Oswald, U. (2017). Seguridad, disponibilidad y sustentabilidad energética en México. *Revista Mexicana de Ciencias Políticas y Sociales*, 62(230), 155-196. [https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0185-19182017000200155](https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0185-19182017000200155)
- Otterbach, D. (2013). *Energía y calentamiento global. ¿Cómo asegurar la supervivencia de la humanidad?* Grupo Editorial Patria.
- Paz, M. F. (2014). Conflictos socioambientales en México: ¿qué está en disputa? En M. F. Paz y N Risdell (Coords.), *Conflictos, conflictividades y movilizaciones socioambientales en México: problemas comunes, lecturas diversas* (pp. 13-57). UNAM, MAPORRÚA.

- Peña, L., y Herrera, L. (2021). El rol del ciudadano en el uso de energías renovables en México, una estrategia para consolidar procesos de desarrollo sostenible. *Brazilian Journal of Animal and Environmental Research*, 4(3), 3368-3379. <https://doi.org/10.34188/bjaerv4n3-045>
- Pereira, L. A., Cortés, D., Bañuelos, M., Balderrama, C. O., y Aguirre, F. E. (2022). *Propuesta metodológica para evaluar la experiencia del usuario en el transporte público de Ciudad Juárez, México para personas con discapacidad* [Ponencia]. 26<sup>th</sup> International Congress on Project Management and Engineering, Tarrasa, España. <http://dspace.aepro.com/xmlui/handle/123456789/3186>
- Ponce, C., García, L. A., Ñeco, R., y Valenzuela, R. A. (2014). Diseño de un sistema híbrido eólico solar para suministro de energía eléctrica a zona rural en el estado de Chihuahua. *Cultura Científica y Tecnológica*, 54(11), 46-62. <https://erevistas.uacj.mx/ojs/index.php/culcyt/article/view/865>
- Ramírez, C. F., Ponce, C., Ñeco, R., García, L. A., y Hernández, M. M. (2016). Dimensionado de una estación para carga de dispositivos móviles a base energía fotovoltaica. *Cultura Científica y Tecnológica*, 13(59), 265-272.
- Rivas, B. A., Zúñiga, G., Sáenz, J. I., Guerrero, S., Segovia, A., y Morales H. A. (2012). Perspectivas de obtención de energía de la biomasa del estiércol del ganado lechero en la región centro-sur de Chihuahua. *Revista Mexicana de Agronegocios*, 30, 872-885. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=14123097009>
- Rubio, I. (2014). Propiedad y naturaleza en la configuración socioambiental de los conflictos. A propósito de los parques eólicos en el Istmo de Tehuantepec. En M. F. Paz y N. Risdell (Coords.), *Conflictos, conflictividades y movilizaciones socioambientales en México: problemas comunes, lecturas diversas* (pp. 111-136). UNAM, MAPORRÚA.
- Secretaría de Energía. (2017). *Programa especial de la Transición Energética 2017-2018*. Sener. <https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/213322/PETE.pdf>
- Secretaría de Energía. (2021). *Balance Nacional de Energía 2020*. Sener. [https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/707654/BALANCE\\_NACIONAL\\_ENERGIA\\_0403.pdf](https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/707654/BALANCE_NACIONAL_ENERGIA_0403.pdf)

- Solís, E. G., Carmona, E. G., y Vázquez, D. (2019). Administración sustentable y su impacto en la rentabilidad de la industria del cemento del estado de Chihuahua. En C. A. Flores, M. I. García, L. R. Sánchez y P. Mercado (Coords.), *Temas selectos de sustentabilidad e integración económica* (pp. 45-54). [https://www.researchgate.net/publication/380489339\\_Administracion\\_sus-tentable\\_y\\_su\\_impacto\\_en\\_la\\_rentabilidad\\_de\\_la\\_industria\\_del\\_cemento\\_del\\_estado\\_de\\_Chihuahua](https://www.researchgate.net/publication/380489339_Administracion_sus-tentable_y_su_impacto_en_la_rentabilidad_de_la_industria_del_cemento_del_estado_de_Chihuahua)
- Sosa, S. E., Méndez, L. C., Enríquez, F. J., y Quezada, A. E. (2020). *Suministro solar alternativo para aire evaporativo* [Ponencia]. Congreso Internacional de Investigación, Villahermosa, México. <https://www.academiajournals.com/pub-tabasco2020>
- Villalobos, I. A., Magaña, J. E., Villarreal, V. H., Hernández, J. E., y Núñez, J. J. (2017). Diseño de una granja productora de trucha arcoíris en Guachochi, Chihuahua. *Revista Biología Agropecuaria*, 5(1), 24-36. <https://revistabioagro.mx/index.php/revista/article/view/89>
- Yáñez, V., Validivia, M. G., y Maldonado, M. A. (2016). Optimización del proceso del biocombustible de manzana. *Cultura Científica y Tecnológica*, 13(59), 191-194. <https://erevistas.uacj.mx/ojs/index.php/culcyt/article/view/1460>

## CAPÍTULO 8.

# LA PERMISIVIDAD DE LO ILEGAL: EXCLUSIÓN SOCIAL POR POBREZA ENERGÉTICA EN ZONAS MARGINALES EN CIUDAD JUÁREZ, MÉXICO

**Hazel Dávalos Chargoy,<sup>1\*</sup> Ana Eréndira Rascón Villanueva<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>Profesora investigadora de la Facultad de Ciencias Políticas y Sociales de la Universidad Autónoma de Chihuahua. \*hazel\_davalos@yahoo.com.mx

<sup>2</sup>Directora del programa de Protección Civil y Emergencias, doctorante en Investigación por El Colegio de Chihuahua.

### Resumen

**D**esde la perspectiva de la pobreza energética, el objetivo de este ensayo es reflexionar acerca de los obstáculos para alcanzar los objetivos propuestos por la Agenda 2030 en contextos de marginalidad. Sabiendo que aún existen zonas que carecen de acceso a la energía tradicional o que el acceso es parcial o incluso ilegal, es posible considerar que, al no haber transitado correctamente a la modernidad, se obstaculiza todavía más el pleno desarrollo e inclusión de algunos grupos socioeconómicos. En este trabajo se estudia un sector urbano conocido como “Los Kilómetros”, ubicado en la periferia surponiente de Ciudad Juárez, México, que ha sido identificado como Zona de Atención Prioritaria (ZAP). Aunque

el análisis que aquí se presenta es aún parcial, puede encontrarse en otros lugares de México y América Latina. Se espera contribuir a ampliar la definición del término “pobreza energética” al entender los procesos que obligan a las personas a acceder a la energía de manera ilegal y cómo el Estado los solapa debido a la incapacidad para cumplir con su responsabilidad de promover el desarrollo social.

Palabras clave: **Pobreza energética; periferias urbanas; Agenda 2030; sectores marginados; acceso ilegal a la energía.**

---

### **Abstract**

From the perspective of energy poverty, the aim of this essay is to reflect on the obstacles to achieving the goals proposed by the 2030 Agenda in marginalized contexts. Knowing that there are still areas that lack access to traditional energy, or that access is partial, or even illegal, it is possible to consider that, by not having correctly transitioned to modernity, the full development and inclusion of some socioeconomic groups is further hindered. This paper studies an urban sector known as “Los Kilómetros”, located in the southwestern periphery of Juarez, Mexico, which has been identified as a Priority Attention Zone (ZAP). Although the analysis presented here is still partial, it can be found elsewhere in Mexico and Latin America. It is hoped to contribute to broadening the definition of the term “energy poverty” by understanding the processes that force people to access energy illegally and how the State overlaps them due to the inability to fulfill its responsibility to promote social development.

Keywords: **Energy poverty; urban peripheries; Agenda 2030; marginated sectors; illegal access to energy.**

## Introducción

En México, los indicadores de desarrollo de servicios básicos para las viviendas permiten inferir que la calidad de vida ha mejorado significativamente para algunos sectores, que hasta hace poco tiempo se encontraban en franco rezago social. No obstante, la pobreza ha incrementado en los años más recientes. De acuerdo con el Consejo Nacional de Evaluación de la Política Pública de Desarrollo Social (Coneval, 2021), el porcentaje de la población que vivía por debajo de la línea de pobreza por ingresos en 2016 era 50.8 %, incrementándose a 52.8 % en 2020, mientras que las personas que se encontraban por debajo de la línea de pobreza extrema por ingresos representaban 14.9 % del total de la población, cifra que aumentó a 17.2 %, en los años señalados.

En cuanto a carencias sociales se refiere, destaca el rezago educativo con una cifra superior a los 19 puntos porcentuales y, de manera específica, en el acceso a servicios de salud el incremento resulta particularmente alarmante, pues si en el año 2016 representaba 15.6 %, en 2020 el porcentaje se elevó a 28.2 %, a la vez que se presentó una disminución en los índices de calidad y espacio en la vivienda y en el acceso a los servicios básicos en las mismas, representando 9.3 % y 17.9 %, respectivamente (Coneval, 2021).

En términos generales, los indicadores señalan que en 2017 en México 99 % de la población tenía acceso a energía eléctrica, 85 % a cocina limpia y 10 % a energías renovables (Tracking SDG 7, 2021). Aunque el Índice de Rezago Social no constituye una medición de pobreza, permite comprender aspectos socioeconómicos asociados a carencias sociales en la medición multidimensional de la pobreza (Coneval, 2021). Chiapas, Guerrero y Oaxaca muestran mayor incidencia en varios de estos indicadores, particularmente los relativos a analfabetismo y educación incompleta, además de viviendas con piso de tierra, que no disponen de agua entubada a la red pública ni de aparatos eléctricos que facilitarían en gran medida el trabajo doméstico, como lo son las lavadoras.

Coahuila, Nuevo León, Aguascalientes y Ciudad de México son las entidades que presentan los grados de rezago social más bajos (Coneval, 2021). De manera particular, el estado de Chihuahua registra un grado de rezago social bajo a pesar de que el porcentaje de la población de 15 años y más con educación básica incompleta asciende a 52.6 %, considerándose, además, que las viviendas que no disponen de agua entubada a la red pública representan 8 % del total de los hogares, las que no disponen de drenaje 14.8 % y las que carecen de energía eléctrica son ligeramente superiores al 6 % (Coneval, 2021).

Pese a que se ha logrado un crecimiento significativo en algunos aspectos, la realidad en la que aún viven algunos sectores de la población mexicana impide el pleno desarrollo de las comunidades, los núcleos familiares y los individuos. Se debe enfatizar el carácter multidimensional y contextual de la pobreza, evitando reduccionismos que únicamente consideran la falta de ingresos.

Debido a que esta situación se presenta en gran parte del mundo, se ha buscado crear los mecanismos que permitan equilibrar las desigualdades sociales a la par de acelerar el crecimiento económico, evitando una mayor degradación ambiental y enfatizando la necesidad de transformar el sistema económico y político dominante que ha afectado a la mayor parte de la población mundial, pues es un hecho que a pesar de los avances en ciencia y tecnología, la pobreza continúa siendo uno de los grandes problemas, poniendo en duda la validez del esquema mundial de reproducción capitalista imperante, en el cual, a través de la división internacional del trabajo, se han profundizado las asimetrías entre unos cuantos países altamente desarrollados y la mayoría de las naciones del planeta, dando como resultado la elevada concentración de la producción, el ingreso, las mercancías y el conocimiento en el grupo de los más desarrollados en detrimento de los menos desarrollados, constituyendo así gran parte de los obstáculos para superar la pobreza, procesos donde además, la globalización ha acentuado aún más estas desigualdades (Romero, 2002).

Bajo este panorama, los Estados miembros de las Naciones Unidas presentaron en 2015 un ambicioso plan de desarrollo contenido en la Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible, en el cual se establece como prioridad la implementación de acciones para erradicar la pobreza, reestablecer el equilibrio ambiental e incrementar la prosperidad a fin de fortalecer la paz y el acceso a la justicia de todas las personas, metas que se esperan alcanzar en el año 2030.

A través de tres ejes que se consideran fundamentales y estrechamente vinculados entre sí, que son el económico, el social y el ambiental, la Agenda propone el cumplimiento de 17 objetivos. Uno de estos, el número 7, trata sobre el acceso a las fuentes de energía para toda la población, ya que es esencial para el desarrollo de “los empleos, la seguridad, el cambio climático, la producción de alimentos o para aumentar los ingresos” (ONU y Cepal, 2016, p. 21). Entre las principales metas de este objetivo está el garantizar el acceso universal a los servicios energéticos asequibles, fiables y modernos para el año 2030, proporcionando a la población el acceso a la electricidad y aumentando la proporción de energía renovable en el conjunto de estas fuentes energéticas (ONU y Cepal, 2016).

Sin embargo, deben ser señalados otros aspectos que son de relevancia para el contexto nacional. En primer lugar, las metas establecidas en los objetivos son difíciles de alcanzar debido a que aún existe un porcentaje de la población que no tiene acceso a la energía eléctrica. De acuerdo con los datos de Banco Mundial (2021a), en 2020 en México el 0.6 % de la población carecía de acceso a la energía eléctrica, lo que equivale a 756 000 personas, debido a sus condiciones de vulnerabilidad e inaccesibilidad o falta de acceso a tecnología moderna. Se debe tomar en cuenta que la energía hidroeléctrica es la mayor fuente renovable en el mundo y que en el año 2020 disminuyó el acceso a energías renovables en los sectores de transporte y calefacción, considerando que los combustibles fósiles siguen siendo la fuente de calefacción de tres cuartas partes de la demanda a nivel mundial (Banco Mundial, 2021b).

En segundo lugar, se debe señalar que no obstante que las personas que carecen de este servicio son pocas comparadas con la población total del país, se ha podido constatar que el acceso a esta energía para una gran parte de la población es dado en condiciones precarias al contar con conexiones inadecuadas o instalaciones de poca calidad, pero también debido a prácticas fuera de la ley, es decir, a través de tomas ilegales por medio de alambres colocados en las líneas que transportan la energía en el cableado principal.

De acuerdo con el INEGI, en el estado de Chihuahua 98.3 % de la población tiene acceso a la energía eléctrica y de manera particular en Ciudad Juárez 99.6 % de la población cuenta con este servicio (INEGI, 2020). Sin embargo, en los recorridos realizados en diversos proyectos de investigación y sus respectivas etapas de trabajo de campo en las áreas periféricas de Ciudad Juárez, se observó que parte de los hogares y locales comerciales acceden de manera ilegal al suministro de energía eléctrica, es decir, que parte de la población establece conexiones irregulares con los cables de alta tensión con el objetivo de desviar la energía hacia sus casas.

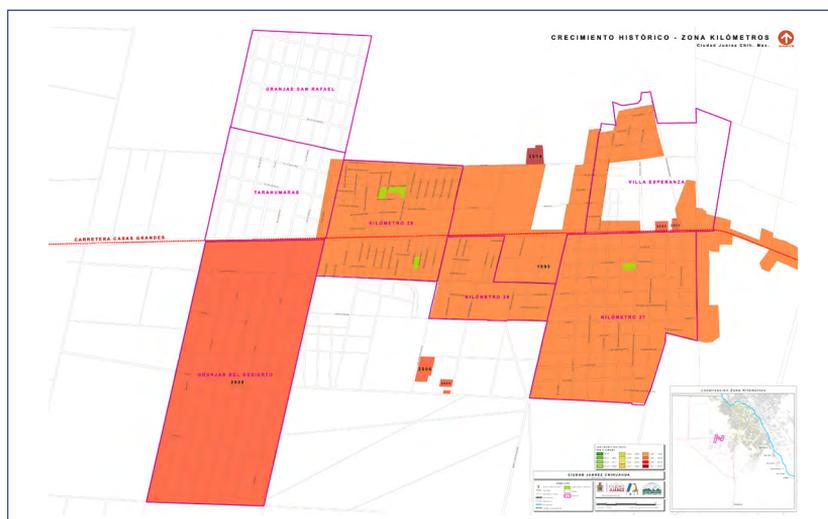
En este contexto se debe considerar que la pobreza energética puede presentarse por falta de infraestructura, pero también por prácticas ilegales en las que de acuerdo con las observaciones y narrativas expresadas en los recorridos de campo, se puede comprender que la mayor parte de los habitantes no tiene intención de regularizar el pago de los servicios a pesar de que las deficientes instalaciones puedan provocar accidentes graves o incendios por el uso de cables a ras de suelo y sin aislamiento. Esto se fundamenta, además, en la propia infraestructura eléctrica de las pocas instalaciones realizadas por Gobierno federal, mismas que se encuentran en franco deterioro y que han sido adaptadas por los vecinos para poder acceder ilegalmente al suministro eléctrico.

El presente ensayo tiene como objetivo reflexionar sobre la imposibilidad de cumplir con las metas propuestas por la Agenda 2030 en contextos de marginalidad. Desde el conocimiento de que aún existen amplias zonas que no cuentan con el acceso a energías tradicionales o

acceden a estas de manera parcial o a través de tomas ilegales, es posible considerar que, al no haberse cumplido las condiciones que posibiliten la modernización, no se ha transitado de manera correcta a la modernidad, dificultando aún más el pleno desarrollo e inclusión de todos los sectores.

En este sentido, es importante precisar que se deberá comprender por modernización el proceso de desarrollo económico, social y cultural que se espera lleve al nivel de organización y producción similar al alcanzado por las sociedades industriales, mejorando las condiciones de vida humana, en concordancia con la idea occidental general de progreso (Barfield, 2000), es decir, que la modernización es el proceso económico de industrialización y tecnificación que permitirá transitar hacia la modernidad, entendiendo esta como el modo de reproducción de la sociedad basada en la dimensión política e institucional de sus mecanismos de regulación en oposición a la tradición, en la que el modo de reproducción del conjunto y el sentido de las acciones que se cumplen es regulado por dimensiones culturales y simbólicas particulares (Freitag, como se cita en Romero, 2015).

**MAPA 1.** Mapa de crecimiento histórico de la Zona de Atención Prioritaria (ZAP) de las colonias conocidas como “Los Kilómetros” de Ciudad Juárez, México



Fuente: IMIP (2023a).

El caso de estudio presentado es el área conocida como “Los Kilómetros”, ubicada en el surponiente de Ciudad Juárez, que se ha identificado como Zona de Atención Prioritaria (ZAP) y en la que habitan más de 13 000 personas (Tabla 1), de las cuales una tercera parte corresponde al grupo de menores de 14 años y aproximadamente dos terceras partes al grupo de personas de 15 a 64 años (Tabla 2).

**TABLA 1.** Población total por sexo y grupos de edad seleccionados, zona de “Los Kilómetros”, 2020

Población	0 a 2 años	% de 0 a 2 años	3 a 5 años	% de 3 a 5 años	6 a 11 años	% de 6 a 11 años	12 a 14 años	% de 12 a 14 años	15 a 17 años	% de 15 a 17 años	18 a 24 años	% de 18 a 24 años	Total
Mujeres	139	31 %	155	28 %	593	38 %	234	33 %	200	31 %	625	40 %	6 260
Hombres	143	31 %	192	35 %	687	44 %	245	35 %	235	37 %	657	42 %	6 771
Datos protegidos	172	38 %	202	37 %	273	18 %	228	32 %	207	32 %	277	18 %	519
Total	454		549		1 553		707		642		1 559		13 550

Nota: Las sumatorias no coinciden con los totales debido a que la tabla está construida con datos a nivel manzana, y a este nivel de desagregación geográfica existen por ley datos confidenciales.

Fuente: IMIP (2023b) con información del Sistema para la Consulta de Información Censal (SCINCE) 2020, INEGI.

Aunque el análisis aquí presentado es aún parcial, puede corresponder a muchos otros lugares del país y de Latinoamérica, con sus debidas particularidades regionales. Este escrito corresponde a un avance de investigación de método cualitativo realizado a través de la herramienta de la etnografía, dado que permite aproximarse a una problemática que se desarrolla en contextos específicos, como lo es el área de “Los Kilómetros”, que si bien conlleva sus propias particularidades, se conoce que la misma problemática se presenta tanto en otras áreas periféricas de la ciudad, como del estado y del mismo país.

**TABLA 2.** Población por grandes grupos de edad, zona de “Los Kilómetros”, 2020

Rango de edad	Cantidad	%
0-14 años*	4 025	32 %
15-64 años	8 273	65 %
65 y más años	430	3 %
<b>TOTAL</b>	<b>12 728</b>	

\*La sumatoria de este rango de edad no coincide con la Tabla 1, debido a que la tabla está construida con datos a nivel manzana, y a este nivel de desagregación geográfica existen por ley datos confidenciales.

Fuente: IMIP (2023b) con información del Sistema para la Consulta de Información Censal (SCINCE) 2020, INEGI.

## Breves apuntes metodológicos y de marco referencial

El presente avance de investigación se ha realizado a través del método cualitativo, considerando que permite explicar desde otras perspectivas la realidad observada. Se busca comprender las cualidades de los hechos sociales y mostrar su heterogeneidad y lógica relacional. Se establece como punto de partida la contrastación de los datos cuantitativos con la evidencia empírica. La herramienta para obtención de información ha sido la observación propia de las investigaciones etnográficas, incluyendo la entrevista formal e informal como parte indisociable de las actividades de observación, ya que forma parte del marco interpretativo debido a su carácter referencial y a que genera distintas reflexividades para producir una nueva.

La etnografía no pretende ser neutral al reconocerse que tanto la presencia como los cuestionamientos de quienes investigan pueden influir sobre quienes informan al reflexionar sobre las respuestas otorgadas, mismas que si bien son presentadas desde su propio esquema, posibilitan que el grupo de estudio describa sus acciones (Guber, 2004, 2015). Su relativa flexibilidad permite reorientar la investigación sobre las hipótesis originalmente planteadas cuando surgen afirmaciones inesperadas o espontáneas por parte de las personas informantes (Le Play, como se cita en González de la Rocha y Villagómez, 2008), como lo fue en el caso de estudio aquí presentado.

Como se explicará más adelante, la conjetura inicial planteaba la vulnerabilidad y marginalidad de la zona de estudio, al considerar únicamente la parte de carencias y rezagos sociales en servicios básicos de vivienda. Posteriormente, conforme se dio curso a la investigación, se reestructuró esta perspectiva al comprender el papel que juegan las autoridades administrativas de los tres niveles de gobierno y particularmente

la agencia de los habitantes de la zona.<sup>1</sup> Es decir, que al profundizar en el conocimiento de los vínculos sociales y el papel de las relaciones de ayuda mutua en esta zona, el proceso de investigación presentó contradicciones entre las conjeturas, los datos y la evidencia empírica que llevaron a replantear los supuestos iniciales mostrando una complejidad cada vez mayor.

Con esto, se asume que se trata de “un proceso dialéctico de experimentación y contrastación entre la teoría y la evidencia empírica” (Palerm, como se cita en González de la Rocha y Villagómez, 2008, p. 300). Por lo tanto, la etnografía permite argumentar acerca de un grupo humano, pronunciando un problema que se fundamenta en interpretaciones y datos con una cierta organización textual, otorgando una traducción conceptual término a término, visibilizando lo que Guber (2015, p. 31) denominó “residuos no explicados” por el sistema conceptual y clasificatorio. De tal manera que a lo largo de este texto se buscará ampliar la definición de pobreza energética, debido a la confrontación presentada entre las primeras conjeturas, teoría y evidencia empírica.<sup>2</sup>

---

1 La importancia y alcance de la etnografía radica en que permite entender el contenido de los procesos sociales, pues al interpretar las categorías se puede comprender la vida de los actores sociales en diferentes espacios y temporalidades, es decir, que no solo describe el comportamiento, sino que trata de explicar lo que lo guía, de tal manera que se busca comprender el comportamiento cultural, pues aunque el carácter situado de la etnografía aparentemente limita a las personas y lugares en los que realiza la investigación, se pueden establecer ciertas generalizaciones y conceptualizaciones que van más allá de los sitios y personas, es decir, que permitirán comprender asuntos más generales del país o incluso del momento histórico, considerando además que, en el marco de una etnografía, si los datos cuantitativos son tomados como punto de partida podrán operar como guía para las técnicas cualitativas, evidenciando sus limitaciones o aciertos (Restrepo, 2018).

2 Dentro del conjunto de la etnografía se incluyen, además de la observación, la entrevista etnográfica y las charlas o narraciones informales. Deberá entenderse por entrevista el diálogo formal orientado por un problema de investigación, y por charlas aquellas conversaciones que surgen de manera espontánea y por lo tanto se consideran de carácter informal, pero que también son una fuente crucial para la investigación etnográfica, pues son lo que permite adentrarnos en la comprensión de la vida social, por lo cual constituyen una técnica de investigación por sí misma (Restrepo, 2018). Cabe precisar que, de acuerdo con Guber (2004), cierta información se obtiene de manera parcial a través de la observación, por lo que la entrevista, incluyendo las charlas de carácter informal, son de las técnicas más apropiadas para acceder al universo de significaciones de los actores sociales, pues a su vez son una instancia de observación, ya que al material discursivo deberá agregarse la información sobre el contexto que la produce, es decir, desde el cual se informa, de tal manera que la descripción y explicación de las y los informantes contribuyen a fundamentar la explicación de quienes investigan,

El término pobreza energética es un concepto que denota el acceso insuficiente o la falta total a la energía como medio que permita realizar actividades de vida cotidiana, como mantener el hogar templado, contar con algún sistema para calentamiento de agua, preparar alimentos y establecer canales de información y comunicación. De acuerdo con Castaño et al. (2020), las primeras bases de este concepto se establecieron en 1979 en Gran Bretaña por Isherwood y Hancock, a raíz de la crisis mundial de petróleo de 1973. Aunque este término se empezó a utilizar desde la década de 1970, Fernández-Amor (2019) indica que la primera definición se propuso en 1983 por Bradshaw, cuando estableció que pobreza energética refiere a la incapacidad de mantener a una temperatura adecuada el hogar.

Aunque algunas regiones de la Unión Europea y de América del Norte cuentan con una cobertura total en el acceso a las energías, se requiere reflexionar sobre las dificultades que pueden presentarse al no contar con ingresos suficientes que permitan erradicar la pobreza energética. De acuerdo con la definición acuñada por Boardman en 2010, un hogar se encuentra en pobreza energética cuando no puede acceder a los servicios adecuados de energía con 10 % de sus ingresos, de tal manera que se calculaba que en 2008 aproximadamente 19 % de los hogares del Reino Unido vivían en pobreza energética (García-Ochoa y Graizboard, 2016, p. 291), por lo cual el alto costo para acceder a la energía también debe ser parte de su definición. Ante este panorama, se han instituido estrategias gubernamentales para atender esta problemática que afecta a miles de personas. Entre estas destacan las creadas en Reino Unido en 2001, en Francia e Irlanda en 2015 y en España a partir de 2018. Se puede establecer, por lo tanto, que la pobreza energética incluye, además de la población marginada, a la que se encuentra en condiciones de exclusión social

---

poniéndola a prueba o especificándola, dando como resultado definiciones múltiples o contradictorias acerca de la misma cultura, sociedad o hechos que son parte fundamental de esa realidad, mismos que serán introducidos y jerarquizados en el curso de la investigación, que en este caso de estudio permitirán confrontar los datos cuantitativos con los de tipo cualitativo, que explican el cómo se viven las diferentes realidades, tanto las del conjunto de actores sociales como las de otras instancias, generalmente gubernamentales, que conllevan cada una su propia agenda.

por daños o falta de infraestructura, que por consecuencia tiene poco o nulo acceso a la energía.

Al respecto, algunos autores como García-Ochoa y Graizbord (2016) y Morales, como se cita en Ramírez (2022), sostienen que en México 36.7 % de los hogares se encuentran en pobreza energética, al definir esta como la carencia de alguno de los servicios o bienes económicos que se consideran básicos para satisfacer las necesidades humanas fundamentales, que son iluminación, entretenimiento, calentamiento de agua, cocción y refrigeración de alimentos y confort térmico en la vivienda.

En algunos países este concepto ha cobrado relevancia debido a las implicaciones que conlleva para la población. Se conoce que en España varios millones de personas no han podido mantener caliente su vivienda cuando el clima lo requiere o se han visto imposibilitadas para pagar sus facturas a tiempo. Esta situación se presenta en todo el mundo, aunque en algunas áreas más acentuadas que en otras. De acuerdo con el Banco Mundial (2021c), en la República Democrática del Congo se registró 42.8 % de acceso a la electricidad en el sector urbano en 2020, mientras que en Haití 80.9 % y en Mozambique 74.8 %, países donde la principal problemática es la insuficiencia de infraestructura para abastecer al territorio y la población. Cabe señalar que México cuenta con una cobertura de energía eléctrica de 99.8 %, de la cual el sector residencial se encuentra en tercer lugar con el consumo de 14 %, siendo el primer lugar el sector transporte con 44 % y el segundo el sector industrial con 35 %. (Espinoza-Dorado y Carrillo-Núñez, 2021).

Existen tres factores que destacan en la pobreza energética: los hogares con ingresos económicos escasos, la baja eficiencia energética y los costos elevados en la energía (SIIS, 2015). Con esto se condiciona en gran medida a la población vulnerable a una mayor dificultad para mejorar sus condiciones de vida con acceso a servicios de baja calidad y altos costos (Calvo et al., 2021). En este sentido, se deberá señalar la importancia de la vulnerabilidad, más allá del concepto de pobreza que expresa únicamente la condición de necesidad como resultado de ingre-

sos insuficientes, limitando la comprensión de múltiples factores sociales que inciden en la condición de vida de las personas con menores ingresos. Por lo cual, el concepto de vulnerabilidad permite dar cuenta de la indefensión, inseguridad, exposición a riesgos y estrés provocados por eventos socioeconómicos extremos, considerando, además, los recursos y las estrategias de las personas para enfrentar el impacto de estas afectaciones (Pizarro, 2001).

Por lo tanto, la vulnerabilidad social es un fenómeno que describe los escenarios vividos por la población que enfrenta circunstancias no favorables provenientes de factores sociales, demográficos, políticos o ambientales (Soares y Sandoval Ayala, 2016). Se considera necesario entender la vulnerabilidad como parte de la realidad humana que permite analizar la situación contextual de las poblaciones, identificando los factores que pueden incidir en esta condición (Artiles López y Sangabriel, 2012). Ejemplo de esto son la falta de regulación en el uso de suelo y el alto costo de zonas habitables que generan como resultado la invasión de terrenos en zonas de riesgo para eventos climáticos extremos, el crecimiento poblacional y la urbanización sin planificación (Ponce Pacheco y Novelo Casanova, 2018).

Por lo tanto, las causas de las limitantes de acceso a las energías se pueden encontrar en diferentes factores a considerar para establecer estrategias de impacto para su atención prioritaria. Es decir, que si bien la pobreza energética es multifactorial, en sí misma es un obstáculo importante que impide alcanzar los Objetivos de Desarrollo Sostenible, dado que el acceso a energías limpias es un proceso de más alto costo, mayor tecnología e infraestructura que requiere una distribución territorial completa.

Al respecto, la Agenda 2030 aprobada en 2015 por la Asamblea General de las Naciones Unidas estableció en el punto 7 de los Objetivos de Desarrollo Sostenible la necesidad de acceso a energía asequible y no contaminante y propuso las siguientes metas (Tabla 3):

**TABLA 3.** Metas e indicadores del acceso a la energía asequible y no contaminante

Metas	Indicadores
7.1 De aquí a 2030, garantizar el acceso universal a servicios energéticos asequibles, fiables y modernos.	7.1.1 Proporción de la población que tiene acceso a la electricidad.  7.1.2 Proporción de la población cuya fuente primaria de energía son los combustibles y tecnologías limpios.
7.2 De aquí a 2030, aumentar considerablemente la proporción de energía renovable en el conjunto de fuentes energéticas.	7.2.1 Proporción de energía renovable en el consumo final total de energía.
7.3 De aquí a 2030, duplicar la tasa mundial de mejora de la eficiencia energética.	7.3.1 Intensidad energética medida en función de la energía primaria y el PIB.
7.a De aquí a 2030, aumentar la cooperación internacional para facilitar el acceso a la investigación y la tecnología relativas a la energía limpia, incluidas las fuentes renovables, la eficiencia energética y las tecnologías avanzadas y menos contaminantes de combustibles fósiles, y promover la inversión en infraestructura energética y tecnologías limpias.	7.a.1 Corrientes financieras internacionales hacia los países en desarrollo para apoyar la investigación y el desarrollo de energías limpias y la producción de energía renovable, incluidos los sistemas híbridos.
7.b De aquí a 2030, ampliar la infraestructura y mejorar la tecnología para prestar servicios energéticos modernos y sostenibles para todos en los países en desarrollo, en particular los países menos adelantados, los pequeños Estados insulares en desarrollo y los países en desarrollo sin litoral, en consonancia con sus respectivos programas de apoyo.	7.b.1 Inversiones en eficiencia energética en proporción al PIB y a la cuantía de la inversión extranjera directa en transferencias financieras destinadas a infraestructura y tecnología para servicios de desarrollo sostenible.

Fuente: Tabla con los datos del Objetivo 7 de la Agenda 2030 y los Objetivos de Desarrollo Sostenible. Una oportunidad para América Latina y el Caribe (ONU y Cepal, 2016).

## **Contexto de estudio: “Los Kilómetros” de Ciudad Juárez, Chihuahua**

---

En el municipio de Juárez, ubicado al norte del estado de Chihuahua y en frontera con Estados Unidos, hasta hace unas décadas la industria local se debía en su mayoría a plantas despepitadoras de algodón, algunas fábricas textiles y de producción de harina de trigo y bebidas. El cambio más drástico ocurrió a partir de la década de 1960 por el interés gubernamental de activar la economía de la frontera norte, para lo cual se creó el Programa Nacional Fronterizo y como parte de este el Programa de Industrialización Fronteriza (PIF), cuyo objetivo fue otorgar grandes facilidades para que las industrias extranjeras se establecieran en ciudades de la frontera norte a fin de emplear a los jornaleros una vez que se dio por terminado el Programa Bracero (González de la Vara, 2009).

Al poco tiempo de implementarse este nuevo acuerdo bilateral se vio que no se había captado a los jornaleros en retorno, pero debido a que las empresas de Estados Unidos buscaban optimizar el rendimiento de su capital a través del establecimiento de plantas en zonas de bajos salarios y a la necesidad de amplios sectores de la población que requería de empleo, es que la ciudad comenzó a crecer aceleradamente al captar la fuerza de trabajo tanto local como migrante.

En este contexto, los inversionistas comprendieron las ventajas que ofrecían lugares como Ciudad Juárez al convertirse en centro maquilador, pues su ubicación bajaba los costos de transportación, la mano de obra era muy barata y existía la posibilidad de complementar las plantas con otras en El Paso, Texas de tal manera que las fábricas que requirieran de muy poca inversión económica pero de mucha fuerza de trabajo se quedaban en el lado mexicano y las que requerían de alta inversión en maquinaria, pero de pocos operarios, abrían del lado estadounidense (González de la Vara, 2009).

Esta situación creó una paradoja de crecimiento, pues por un lado otorgó empleos de baja calificación y derrama salarial de bajo ingreso para un sector poblacional cada vez más necesitado de trabajo, además de la urgencia de establecer la infraestructura económica que permitiera su desarrollo, como la construcción de parques industriales y vialidades, servicios aduanales y de transporte, entre otros; pero por otra parte, contribuyó a la construcción de la precariedad laboral y a la conformación de una masa trabajadora vulnerable que ha perdido poder adquisitivo a lo largo de casi cinco décadas, fomentando la formación de cinturones de miseria (Ampudia, 2015).

En un inicio se esperaba que la industria se estableciera hacia el sur de la ciudad, pero la apertura del Parque Bermúdez, creado específicamente para las maquiladoras a finales de la década de 1960, modificó la traza urbana, de tal manera que en los siguientes años se abrieron más parques en zonas que eran agrícolas. Con la llegada de población migrante que buscaba emplearse, la ciudad se extendió de manera explosiva hacia el poniente, sur y oriente. Ante la falta de lugares para vivir, miles de personas invadieron terrenos, formando colonias precarias que surgieron en zonas de propiedad pública o cercanas a los parques industriales (González de la Vara, 2009).

Una de las zonas que comenzaron a habitarse a raíz de la necesidad de la población migrante de encontrar lugares para establecerse fue el área que se ubica al surponiente de la ciudad y que de manera común se ha denominado “Los Kilómetros”, formada por el conjunto de colonias Granjas del Desierto, Granjas de San Rafael, Kilómetro 27, Kilómetro 28, Kilómetro 29, Tarahumara y Villa Esperanza (IMIP, 2023a). Esta área tuvo su mayor crecimiento durante la década de los noventa y la primera década de siglo XXI, cuando las personas migrantes se asentaron en un espacio alejado de la mancha urbana y desprovisto de servicios básicos como agua, alumbrado público, sistema de drenaje y servicio de transporte urbano, escuelas suficientes, centros de salud o espacios de esparcimiento público, por lo cual, debido a las carencias económicas, de equipa-

miento urbano e inaccesibilidad a servicios básicos, las colonias de “Los Kilómetros” se consideran como Zona de Atención Prioritaria (ZAP), no obstante que, de acuerdo con el Plan de Desarrollo Urbano Sostenible de Ciudad Juárez de 2016, se advierte que cubrir las necesidades básicas de esta zona implica un costo muy alto, por lo que no se pretende atender las necesidades de la población que ahí habita (Marín-Guevara, 2019).

Se debe señalar que en Ciudad Juárez se pueden identificar tres tipos de periferias con características muy diferentes según su ubicación. De acuerdo con Marín-Guevara (2019, p. 11), están constituidas tanto por la población migrante como por la expulsión de personas locales que no poseen los recursos necesarios para vivir en zonas consolidadas, identificando la primera al poniente, delimitada al norte por el río Bravo y al poniente por la Sierra de Juárez; la segunda, al surponiente sobre la carretera a Casas Grandes, donde se ubican “Los Kilómetros”, mientras que la tercera zona se encuentra al suroriente de la ciudad junto al río Bravo. Como en muchos otros espacios, las periferias de Ciudad Juárez son resultado del crecimiento expansivo, caracterizado por su estado de irregularidad, alto índice de pobreza y bajo bienestar social, ofreciendo a quienes carecen de los recursos necesarios un espacio para habitar debido al bajo costo del suelo, o nulo, si este es ocupado por la fuerza, pero que dificulta el acceso en bienes y servicios básicos, además de la lejanía con el centro urbano. En este sentido, las dos primeras áreas periféricas identificadas corresponden a lo que se ha denominado “periferia irregular”, no obstante que existen nuevas dinámicas que llevan a comprender que también se presentan “periferias regulares”, que para el caso de Ciudad Juárez es la que se encuentra en el suroriente y en la que se han construido de forma masiva viviendas de interés social (Talavera-Martínez, 2020, p. 7).

El sistema económico en el que se ha visto inmersa la frontera norte aparentemente generó una derrama económica para todas las partes involucradas. Sin embargo, la evidencia indica que esta derrama ha beneficiado a la parte inversora, sin haber otorgado condiciones de vida adecuadas para el sector operador que vive en situación de marginalidad,

entendiendo que esta es multidimensional, pues abarca los aspectos económicos, sociales, culturales y políticos, dando como resultado una de las asincronías o falta de concordancia más notables de la modernización de América Latina (Cortés, 2017). Si bien la marginalidad corresponde también a la falta de participación y de pertenencia a la sociedad, en América Latina una de sus características es la coexistencia de una sociedad participante, aislada y hegemónica, en contraposición a otra sociedad que vive en condiciones de marginalidad, donde la afectación será la experiencia económica, pero sobre todo cultural, reflejándose en todas las esferas de la vida social al impedir la plena integración de las poblaciones periféricas a la sociedad (Vekemans en Cortés, 2017).

Estos procesos de urbanización corresponden a una problemática mucho más amplia que se desarrolla desde la dependencia latinoamericana (Quijano en Cortés, 2017), entendiendo por esta la negligencia o intención deliberada de los países ubicados en el centro del sistema capitalista mundial que condujo —y aún lo hace— a la explotación de los países pobres de la periferia, lo que significa una permanente concentración de capital al centro y ausencia del mismo en los países subdesarrollados (Cepal, s.f.), por lo cual, la tendencia a concentrar el desarrollo urbano en las zonas directamente articuladas al sistema de dependencia donde se produjo la expansión y cambio de la economía urbana, estimularía la atracción de población para estas áreas desde otras localidades de mayor subdesarrollo y modernidad, consolidando así una doble dependencia (Cortés, 2017). Se considera que en este caso deberá entenderse como la periferia de la periferia.

Con esto, se acentúa la desigualdad de varios sectores de la estructura económica que se expresará en la existencia de una población excedente sin posibilidad de ser incorporada al sector más moderno de la economía, quedando en áreas de menor productividad y en empresas de menor capacidad tecnológica y financiera, ocupando los espacios de mínima productividad y baja calificación, donde el mercado es inestable y los salarios son bajos o limitados, es decir, que esta población no es

expulsada del sistema, pero se ve afectada al acentuarse los desequilibrios entre los varios niveles del sistema (Cortés, 2017).

En Ciudad Juárez, los espacios periféricos han sido el lugar donde se ha albergado gran parte de la población en movilidad que no cuenta con los recursos que les permita pagar rentas en áreas donde se den condiciones urbanas justas, puesto que la prioridad se le dio a la industria maquiladora sobre las necesidades de la ciudadanía, facilitando la dispersión de la mancha urbana en la que al centro geográfico se encuentra la zona más desarrollada y a las orillas la falta de equipamiento urbano y servicios básicos, generando una segregación espacial que produce una estratificación jerárquica por clases sociales, inequidad urbana y social (Marín-Guevara, 2019).

Las zonas alejadas de los centros son una determinación física, con un espacio social específico, que para algunos lugares de Latinoamérica corresponde a la favela, el campamento o la villa miseria (Vekemans en Cortés, 2017), mientras que para México serán las periferias. Pero estas periferias, al encontrarse en un territorio identificado, deberán comprenderse también como el espacio definido y delimitado por y a partir de relaciones de poder, por lo tanto, las territorialidades se constituyen en las más variadas escalas espacio-temporales a partir de las relaciones de poder (Benedetti, 2011).

Al igual que en otros territorios, en la zona de estudio se observan relaciones de poder que se manifiestan en ciertas formas de tensión, apropiación, negociación y simulación entre habitantes de la zona, grupos solidarios generalmente de tipo religioso y programas de desarrollo social de asociaciones civiles o de los tres niveles de gobierno. Parte de estas ocurren en las prácticas que se dan a través de figuras de liderazgo para diferentes tipos de beneficios como el acceso a los recursos materiales y servicios básicos. Es importante mencionar el acceso a otros servicios debido a la relevancia que toma para el caso aquí planteado y su relación con el hábitat de las personas en “Los Kilómetros”, pero también por las estrategias que se generan entre vecinos y otros grupos, particularmente

las áreas administrativas de los diferentes niveles de gobierno. Entre estos destaca la falta de red pública de distribución de agua potable y drenaje para consumo humano y actividades de la vida cotidiana. Ante esta ausencia, una parte de las construcciones cuentan con fosa séptica y se ha generado un sistema de distribución gratuito de agua potable a través de la Junta Municipal de Agua y Saneamiento de Juárez por medio de pipas que realizan el llenado de bidones o tinacos en cada casa.

En cuanto a la pavimentación de la zona se ha podido constatar que son muy pocas las vías que cuentan con recubrimiento asfáltico, observándose que la gran mayoría son caminos de terracería, generando problemas de movilidad y de anegamiento de agua en temporada de lluvia o de circulación de polvo en las épocas donde se presentan ráfagas de viento, aunado a que no se cuenta con banquetas o espacios designados para la circulación de peatones (Talavera-Martínez, 2020).

En cuanto a la cobertura de los servicios básicos de las viviendas, distintos indicadores oficiales señalan que la mejor cobertura la tiene la electricidad al otorgar este servicio a 99.6 % de las casas. Sin embargo, se omite indicar que existen zonas de la ciudad que acceden a este servicio por medio de tomas clandestinas, que de manera coloquial se les ha denominado “diablitos” o “colgados”; es decir, que de manera efectiva, se presume que casi 100 % de la población cuenta con este servicio, mas no se especifica de qué manera se lleva a cabo (Acosta-Beltrán, 2015). Esta situación es muy notable en la zona de “Los Kilómetros”, donde la mayoría de las casas habitación y locales se encuentran conectados a la fuente de energía de manera ilegal.

En cuanto al acceso a otras energías, la población de esta zona se abastece de gas por medio de tanques o cilindros. Se debe considerar que el acceder a la energía eléctrica de manera ilegal ha permitido que algunos hogares cuenten con aparatos electrodomésticos para enfriar o calentar los hogares de acuerdo con el clima prevaleciente, no obstante que los hogares menos privilegiados no cuentan con estos aparatos y deberán ca-

lentar sus hogares por medio de la combustión de gas o de otros elementos como el desperdicio de maderas o leña durante los meses de invierno, incrementando en gran medida el gasto familiar.

Como se mencionó anteriormente, algunos autores sostienen que en México 36.7 % de los hogares se encuentran en pobreza energética, al definir esta como la carencia de alguno de los servicios o bienes económicos que se consideran básicos para satisfacer las necesidades humanas fundamentales, que son iluminación, entretenimiento, calentamiento de agua, cocción y refrigeración de alimentos y confort térmico en la vivienda (García-Ochoa y Graizbord, 2016; Morales como se cita en Ramírez, 2022), reiterando que desde esta perspectiva se considera el acceso a la infraestructura sin tomar en cuenta la capacidad de pago por el servicio o a la posesión de determinados elementos materiales, para definir la pobreza energética.

Por lo tanto, es necesario enfatizar que desde la realidad observada en “Los Kilómetros” tampoco se está considerando la manera de acceder a servicios, como el de la energía eléctrica, a través de tomas ilegales, pero que muchas veces este acceso ilegal está siendo solapado por las propias instancias de gobierno a fin de sostener a una población que de otra manera se vería imposibilitada de contar con estos recursos por deficientes instalaciones y/o por baja percepción salarial. Es decir que, al menos para el caso de “Los Kilómetros”, la capacidad de pago tampoco puede ser un indicativo para erradicar la pobreza energética debido a que su población accede a esta sin haber realizado el pago del servicio. Esta situación también se observa en casas y locales de las otras periferias de la ciudad. Ante este panorama, se puede hablar de una “ciudad informal” en sus asentamientos periféricos, donde según Talavera-Martínez (2020):

...la misma ilegalidad de la periferia obligó a las administraciones públicas a ceder y flexibilizar las normas para finalmente hacer legal lo ilegal, en este sentido no solo se habla de otorgar un título de propiedad, sino de otorgar los anhelados derechos de la ciudad, el acceso a los bienes, servicios e infraestructura que brindan calidad de vida urbana. (p. 37)

A esta perspectiva habrá que añadir que también se ha hecho legal lo ilegal al permitir el acceso de manera clandestina a servicios como la energía eléctrica o el otorgamiento de agua potable de manera gratuita ante la omisión de políticas reguladoras que requerirían de una muy alta inversión de recursos para una población que si bien forma parte del sistema productivo de distintas maneras, no se considera parte del polo hegemónico de producción de capital. Es decir, que se permite la irregularidad ante la omisión de los distintos órdenes de gobierno para regularizar las problemáticas que ocurren en “Los Kilómetros”, manteniendo así en un alto rezago social a su población. Por lo tanto, “la ciudad informal que consiste en que la informalidad se refleja no solo en el espacio construido, sino que puede extenderse hacia sistemas más complejos, como la economía, es decir, en este caso la informalidad transmuta en nuevos procesos socioculturales” (Talavera-Martínez, 2020, p. 38).

Debido a la presencia de estas estrategias es que se puede hablar de que existe, por una parte, una agencia de los habitantes que se manifiesta en las distintas formas de adaptación a circunstancias de desigualdad y rezago social, a fin de evitar mayores gastos por el pago de los servicios, pero por otra parte se puede inferir que las propias administraciones públicas solapan dichas prácticas para evadir que los vecinos exijan la inversión económica para el desarrollo de la zona que implica la red de distribución de agua potable, drenaje y alcantarillado, pavimentación e infraestructura urbana, entre muchos otros. De acuerdo con esto, es posible afirmar que:

...las ciudades informales se consideran en todo caso, urbes rebeldes en donde el ciudadano al no contar con condiciones accesibles para el desarrollo de su vida urbana en condiciones plenas se adapta y se apropia del espacio y lo amolda según las condiciones posibles. En esta ciudad informal, es la acción social quien predomina para la planeación y desarrollo de la configuración urbana, o, en otras palabras, no es que carezca de una planeación o una regulación del mercado, sino que su crecimiento responde enteramente a una respuesta social y de supervivencia. (Talavera-Martínez, 2020, p. 38)

## Conclusiones

El proceso de crecimiento urbano de Ciudad Juárez corresponde en mayor medida a cuestiones relacionadas a la movilidad humana que migró de otras regiones del estado y del país para insertarse en un mercado laboral que demandaba mano de obra para el sector maquilador debido a políticas bilaterales generadas para el desarrollo de la frontera a través del fomento a la inversión extranjera. Sin embargo, las políticas que permitieron este desarrollo solo consideraron al sector empresarial y de manera muy parcial o prácticamente nula al sector obrero, generando profundos desequilibrios en los modos de habitar la ciudad.

El caso de “Los Kilómetros” es parte de las periferias que se formaron como respuesta a la profunda crisis económica y del campo mexicano, que exigía a las personas buscar otras alternativas para su subsistencia y a la constante demanda de mano de obra asalariada y poco calificada que requerían las maquiladoras. De tal manera que quienes necesitaron de un espacio para habitar acrecentaron los cinturones periféricos, que están fuertemente ligados “a la economía por una de las razones más simples, la falta de capital para adquirir suelo urbano, [obligando] a las familias y a los individuos a hacer uso de métodos alternativos e ilegales para adquirirlo” (Talavera-Martínez, 2020, p. 42).

Debido a que el Estado en sus diferentes niveles no proporcionó a una gran parte de la población los servicios básicos para las viviendas ni brindó las garantías de bienes, se recurrió a prácticas informales e ilegales. Las periferias son un espacio que debe habilitarse para poder habitar, pues de manera frecuente quienes ahí se asentaron lo hicieron por ser la única alternativa costeable para su capacidad económica (Talavera-Martínez, 2020). Ante la falta de infraestructura que permita acceder a los servicios básicos de manera regular, se han generado estrategias para suplir estas carencias, mismas que al realizarse en un territorio definido implica forzosamente relaciones de poder que conlleva negociaciones y tensiones entre los distintos grupos.

Se considera que estas estrategias han sido medidas paliativas en lugar de establecer soluciones a situaciones que deben ser prioritarias a fin de garantizar los derechos de todas las personas. Entre estas medidas, se ha abastecido de agua potable de manera gratuita, se ha permitido el uso del suelo que ha sido ocupado de manera ilegal en gran parte de los casos y se ha permitido el acceso a la energía eléctrica desde tomas clandestinas. Se puede inferir que estas medidas evitan otros problemas al mantener de cierta manera la funcionalidad de la zona y con esto, las posibilidades de habitarla, aunque las obligaciones de la ciudadanía se vean exentas de cumplirse ante la precarización salarial, a la par que sus derechos se vean parcial o totalmente disminuidos. Es decir, que las responsabilidades de cada una de las partes, ciudadanía y administración pública del Estado, se incumplen. Desde esta perspectiva se infiere, por lo tanto, que existe una negociación no tácita entre ambos actores.

Es evidente que en este contexto no se establecerá ninguna política que regularice la situación de las personas que habitan “Los Kilómetros”, pues por una parte quienes se encuentran asentados en estas colonias exigen sus derechos de manera parcial ante la posibilidad que podría suscitarse de perder, si fueran regularizados, el beneficio de algunos servicios que hasta el momento han obtenido de manera gratuita. De igual manera, el Estado solapa estas prácticas a fin de evitar la inversión económica que conlleva realizar las regulaciones correspondientes.

Por esto, se considera que a las distintas definiciones que se han generado con la intención de conceptualizar la pobreza energética deberán sumarse las características aquí señaladas, considerando que el robo de energías, muchas veces solapado por consecuencia de la falta de implementación de políticas públicas de desarrollo social por parte del Estado, también debe formar parte del análisis conceptual de la pobreza energética. Por lo tanto, se propone ampliar el análisis conceptual y la definición de pobreza energética al incorporar otros aspectos, como la ilegalidad en el acceso a las energías y la permisividad del Estado hacia estas prácticas como parte de la omisión, incapacidad o negativa al desarrollo social.

En este mismo sentido, será necesario comprender las formas de interacción y las respuestas de la población en estrecha vinculación con las medidas otorgadas por las instituciones de los tres órdenes de gobierno ante la omisión de las políticas que regulen situaciones específicas como las observadas en “Los Kilómetros”. Por lo tanto, deberán analizarse las formas de adaptación de la población a determinadas circunstancias como forma de resistencia, pero también como una manera en que las instancias de gobierno logran mantener cierto orden a fin de evitar mayores dificultades que exijan el cumplimiento de sus obligaciones. Esto deberá ser entendido como una constante tensión entre grupos que permite sostener las actividades de vida cotidiana de la población que habita la zona, pero no garantiza que el vínculo establecido entre ambos grupos como forma de coexistencia sea respetado, por lo cual se debe considerar la fragilidad de estas relaciones al no haber ningún tipo de regulación en el cumplimiento de las obligaciones que conlleva el Estado hacia su población, como tampoco se dará el cumplimiento de las obligaciones que la ciudadanía tiene para con el Estado, no obstante que se vean mermados parcial o totalmente sus derechos.

Por lo tanto, es posible considerar que en algunas áreas de México la población no está preparada en infraestructura ni en materia social, cultural y económica para sumarse a las acciones implementadas que tienen como objetivo principal adoptar el uso de energías limpias, pero que en gran medida son consecuencia de políticas dirigidas a beneficiar al sector empresarial sin considerar en ningún momento los derechos de la población que requiere de los servicios básicos para habitar de manera digna el espacio que ocupa.

Para lograr esto, primero será necesario asegurar el acceso a la energía de toda la población, regularizar y/o reubicar a la población que habita asentamientos irregulares y evitar que sigan existiendo este tipo de asentamientos que no permiten el acceso total a infraestructura, tecnología y servicios bajo una planeación estratégica y con estudios de viabilidad previos a las construcciones. Aunado a lo anterior, también está

el factor del material que se utiliza para construcción, pues para sumar aún más al concepto de uso de energías limpias, se considera indispensable que sea térmico y que esté regulado para asegurar una mejora del medioambiente, ahorro en el uso de energías y construcción con enfoque ecológico.

## REFERENCIAS

- Acosta-Beltrán, D. B. (2015). Especulación del suelo, vivienda e infraestructura urbana en Ciudad Juárez. En L. Barraza (Coord.), *Diagnóstico sobre la realidad social, económica y cultural de los entornos locales para el diseño de intervenciones en materia de prevención y erradicación de la violencia en la región norte: el caso de Ciudad Juárez, Chihuahua* (pp. 121-159). Segob, Comisión para Prevenir y Erradicar la Violencia contra las Mujeres. <https://www.yumpu.com/es/document/read/39890773/conavim-juarez>
- Ampudia, L. (2015). Empleo y estructura económica en el contexto de la crisis en Ciudad Juárez. En L. Barraza (Coord.), *Diagnóstico sobre la realidad social, económica y cultural de los entornos locales para el diseño de intervenciones en materia de prevención y erradicación de la violencia en la región norte: el caso de Ciudad Juárez, Chihuahua* (pp. 11-56). Segob, Comisión para Prevenir y Erradicar la Violencia contra las Mujeres. <https://www.yumpu.com/es/document/read/39890773/conavim-juarez>
- Artiles López, D. M., y Sangabriel, A. S. (2012). Construyendo la vulnerabilidad. Un riesgo para todos. *Arquitectura y Urbanismo*, 33(2), 68-78. [http://www.scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1815-58982012000200006](http://www.scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1815-58982012000200006)
- Banco Mundial. (2021a). *Acceso a la electricidad (% de población)*. <https://datos.bancomundial.org/indicador/EG.ELC.ACCS.ZS>
- Banco Mundial. (2021b). *El acceso universal a la energía sostenible seguirá siendo inalcanzable, a menos que se aborden desigualdades*. <https://www.bancomundial.org/es/news/press-release/2021/06/07/report-universal-access-to-sustainable-energy-will-remain-elusive-without-addressing-inequalities>
- Banco Mundial. (2021c). *Acceso a la electricidad, sector urbano (% de la población urbana)*. <https://datos.bancomundial.org/indicador/EG.ELC.ACCS.UR.ZS?locations=ZA>
- Barfield, T. (2000). *Diccionario de antropología*. Siglo XXI Editores.

- Benedetti, A. (2011). Territorio: concepto integrador de la geografía contemporánea. En P. Souto (Coord.), *Territorio, lugar, paisaje: prácticas y conceptos básicos de geografía* (pp. 5-83). Editorial de la Facultad de Filosofía y Letras Universidad de Buenos Aires.
- Calvo, R., Álamos, N., Billi, M., Urquiza, A., y Contreras Lisperguer, R. (2021). *Desarrollo de indicadores de pobreza energética en América Latina y el Caribe. Serie Recursos Naturales y Desarrollo, 207*. Cepal. [https://repositorio.cepal.org/bitstream/handle/11362/47216/4/S2100433\\_es.pdf](https://repositorio.cepal.org/bitstream/handle/11362/47216/4/S2100433_es.pdf)
- Castaño, R. R., Solís, G. J., y Marrero, M. (2020). Midiendo la pobreza energética. Una revisión de indicadores. *Revista Hábitat Sustentable, 10(1)*, 9-21. <https://dx.doi.org/10.22320/07190700.2020.10.01.01>
- Comisión Económica para América Latina y el Caribe. (s.f.). *Ideas sobre desarrollo*. Cepal. [https://repositorio.cepal.org/bitstream/handle/11362/32701/D-16826.00\\_es.pdf?sequence=1&isAllowed=y#:~:text=La%20teor%C3%ADa%20de%20la%20dependencia,del%20mismo%20en%20los%20pa%C3%ADses](https://repositorio.cepal.org/bitstream/handle/11362/32701/D-16826.00_es.pdf?sequence=1&isAllowed=y#:~:text=La%20teor%C3%ADa%20de%20la%20dependencia,del%20mismo%20en%20los%20pa%C3%ADses)
- Consejo Nacional de Evaluación de la Política Pública de Desarrollo Social. (2021). *Pobreza en México. Resultados de pobreza en México 2020 a nivel nacional y por entidades federativas*. Coneval. <https://www.coneval.org.mx/Medicion/Paginas/Pobrezalnicio.aspx>
- Cortés, A. (2017). Aníbal Quijano: marginalidad y urbanización dependiente en América Latina. *Polis, Revista Latinoamericana, 16(46)*, 221-238. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=30551302011>
- Espinosa-Dorado, A. L., y Carrillo-Núñez, M. P. (2021). Características de la pobreza energética en México: un enfoque desagregado. *Revista Legislativa de Estudios Sociales y de Opinión Pública, 14(30)*, 77-116. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=7992835>
- Fernández-Amor, J. M. (2019). *Vulnerabilidad y pobreza energética. Colonia de Pan Bendito*. Escuela Técnica Superior de Arquitectura de Madrid, Universidad Politécnica de Madrid. [https://oa.upm.es/55970/1/TFG\\_Fernandez\\_%20Amor\\_Jose%20Maria.pdf](https://oa.upm.es/55970/1/TFG_Fernandez_%20Amor_Jose%20Maria.pdf)

- García-Ochoa, R., y Graizbord, B. (2016). Caracterización espacial de la pobreza energética en México. Un análisis a escala subnacional. *Economía, Sociedad y Territorio*, 16(51), 289-337. [https://www.scielo.org.mx/scielo.php?pid=S1405-84212016000200289&script=sci\\_abstract](https://www.scielo.org.mx/scielo.php?pid=S1405-84212016000200289&script=sci_abstract)
- González de la Rocha, M., y Villagómez, P. (2008). ¿Encuesta o etnografía? En F. Cortés, A. Escobar Latapí y M. González de la Rocha (Coords.), *Método científico y política social. A propósito de las evaluaciones cualitativas de programas sociales* (pp. 297-372). El Colegio de México.
- González de la Vara, M. (2009). *Breve historia de Ciudad Juárez y su región*. El Colegio de Chihuahua.
- Guber, R. (2004). *El salvaje metropolitano: reconstrucción del conocimiento social en el trabajo de campo*. Paidós.
- Guber, R. (2015). *La etnografía. Método, campo y reflexividad*. Siglo XXI Editores.
- Instituto Municipal de Investigación y Planeación. (2023a). *Mapa de crecimiento histórico-Zona Kilómetros Ciudad Juárez, Chihuahua México. Escala 1:7,000*. IMIP.
- Instituto Municipal de Investigación y Planeación. (2023b). *Datos sociodemográficos zona Los Kilómetros*. IMIP.
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía. (2020). *Cuéntame... Información por entidad*. INEGI. <https://cuentame.inegi.org.mx/monografias/informacion/chih/poblacion/vivienda.aspx?tema=me&e=08>
- Marín-Guevara, M. I. (2019). *Los kilómetros: la periferia negada. Apropiación del espacio público como alternativa para la creación de equidad socio territorial y disminución de violencias en la periferia de Ciudad Juárez, Chihuahua* [Tesis de maestría]. Repositorio institucional de la Universidad Iberoamericana de Puebla. <https://repositorio.iberopuebla.mx/handle/20.500.11777/4369>
- Organización de las Naciones Unidas, y Comisión Económica para América Latina y el Caribe. (2016). *Agenda 2030 y los Objetivos de Desarrollo Sostenible. Una oportunidad para América Latina y el Caribe*. ONU, Cepal. <https://www.cedhnl.org.mx/bs/vih/secciones/planes-y-programas/Agenda-2030-y-los-ODS.pdf>

- Pizarro, R. (2001). *La vulnerabilidad social y sus desafíos: una mirada desde América Latina*. Cepal, División de Estadísticas y Proyecciones Económicas. <https://repositorio.cepal.org/server/api/core/bitstreams/3facc730-98f5-4112-9ef5-9d4892cefd74/content>
- Ponce Pacheco, A., y Novelo Casanova, D. (2018). Vulnerabilidad y riesgo en el Valle de Chalco Solidaridad, Estado de México, México. Caso de estudio: El Triunfo, Avándaro and San Isidro. *Investigaciones geográficas*, (97). <https://www.investigacionesgeograficas.unam.mx/index.php/rig/article/view/59675>
- Ramírez, L. (2022, 16 de enero). Sin luz ni refrigeración. La pobreza energética afecta a 46 millones de personas en México. *Animal Político*. <https://www.animalpolitico.com/verificacion-de-hechos/te-explico/pobreza-energetica-en-mexico-que-es>
- Restrepo, E. (2018). *Etnografía: alcances, técnicas y éticas*. Fondo Editorial de la Universidad Nacional Mayor de San Marcos. <https://www.aacademica.org/eduardo.restrepo/3>
- Romero, A. (2002). *Globalización y pobreza*. Ediciones Unariño de la Universidad de Nariño. <https://corteidh.or.cr/tablas/r25216.pdf>
- Romero, G. V. (2015, 18 de enero). *Modernidad vs modernización: diferencias*. *Novagob*. <https://red.novagob.org/modernidad-vs-modernizacion3n-diferencias/>
- Servicio de Información e Investigación Social. (2015). Análisis cuantitativo sobre la incidencia de la pobreza energética en Gipuzkoa 2014. *Departamento de Medio Ambiente y Obras Hidráulicas*, 90(68). SIIIS, Centro de Documentación y Estudios. <https://www.gipuzkoa.eus/eu/web/ingurumena/-/an%C3%A1lisis-cuantitativo-sobre-la-incidencia-de-la-pobreza-energ%C3%A9tica-en-gipuzkoa-2014-pobreza-energetikoaren-eragina-gipuzkoan-2014-analisi-kuantitatiboa>
- Soares, D., y Sandoval Ayala, N. C. (2016). Percepciones sobre vulnerabilidad frente al cambio climático en una comunidad rural de Yucatán. *Tecnología y Ciencias del Agua*, 7(4), 113-128. [http://repositorio.imta.mx/bitstream/handle/20.500.12013/1704/TCA\\_063.pdf;jsessionid=5B1E947D61004360789F8AB-8592DF700?sequence=3](http://repositorio.imta.mx/bitstream/handle/20.500.12013/1704/TCA_063.pdf;jsessionid=5B1E947D61004360789F8AB-8592DF700?sequence=3)

Talavera-Martínez, D. (2020). *El derecho a la ciudad en la periferia: caso de estudio de la zona de “Los Kilómetros” en Ciudad Juárez, Chihuahua* [Tesis de maestría no publicada]. Instituto Municipal de Investigación y Planeación y El Colegio de Chihuahua.

Tracking SGD 7. (2021). *The energy progress report*. <https://trackingsdg7.esmap.org/>

# CAPÍTULO 9.

## LA DEMOCRACIA ENERGÉTICA EN MÉXICO. UNA TAREA PENDIENTE

**Luis Ramón Moreno Moreno,<sup>1</sup> Virginia Guadalupe López Torres<sup>\*</sup>**

<sup>1</sup>Profesor investigador de la Facultad de Ciencias Administrativas y profesora investigadora de la Facultad de Ciencias Administrativas y Sociales, ambas dependientes de la Universidad Autónoma de Baja California (UABC). \*lmoreno@uabc.edu.mx \*virginia.lopez@uabc.edu.mx

---

### Resumen

**E**ste documento presenta un análisis sobre el concepto de democracia energética a través de la revisión de literatura, datos de generación y uso de la energía y la legislación aplicable en México; asimismo, se describen algunas experiencias de democratización energética en Europa. Se analiza el escenario de transición hacia la democratización de energía en el país, así como los retos y beneficios potenciales de su implementación.

Palabras clave: **Energía; legislación; generación y distribución; fuentes renovables.**

## Abstract

This document presents an analysis of the concept of energy democracy through a review of the literature, energy generation and use data, and applicable legislation in Mexico; likewise, some experiences of energy democratization in Europe are described. The transition scenario towards the democratization of energy in the country is analyzed, as well as the challenges and potential benefits of its implementation.

Keywords: **Energy; legislation; generation and distribution; renewable sources.**

---

## Introducción

---

La Agenda 2030 de las Naciones Unidas establece las grandes problemáticas que a nivel global deben resolverse en el corto y mediano plazo. De forma específica, en la dimensión energética, asociada al séptimo de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), se busca garantizar el acceso universal a una energía asequible, segura, sostenible y moderna antes del año 2030, y donde la vía para alcanzarlo estaría representada por la democracia energética (Atutxa et al., 2022).

La democracia energética<sup>1</sup> es un constructo en desarrollo, y en ese sentido, algunos autores refieren que esta implica alcanzar un sistema de energía socialmente justo, con acceso universal, tarifas asequibles, con puestos de trabajo seguros, sindicalizados y bien remunerados, mientras que para otros el énfasis es el de institucionalizar nuevas formas de gobernanza participativa que favorezcan la transición hacia un sistema

---

<sup>1</sup> Su principal objetivo es la descarbonización para lograr una transición energética; sin embargo, debe ampliar su alcance, es decir, pasar de lo local a lo global, lo que generaría un mayor impacto (Berthod et al., 2023).

energético basado en energías renovables, con un enfoque local, particularmente en la forma de proyectos energéticos comunitarios (Barcena et al., 2023; Droubi et al., 2022; Judson et al., 2022; Wahlund y Palm, 2022; Choi, 2021; Williams y Sovacool, 2020).

En la forma de proyectos energéticos comunitarios, la democracia energética se operacionaliza en las cooperativas de energía, instrumentos que involucran de forma directa a los ciudadanos en la generación y distribución de energía. Pero, la ausencia de voluntad política para encaminar a la economía hacia lo verde se debe en parte a la gran interdependencia con la industria de los combustibles fósiles, que para México representó en el año 2018 el 3.5 % del producto interno bruto (PIB) como resultado de ingresos por extracción de petróleo y gas natural —cabe mencionar que en la década de los noventa estos ingresos representaron 9.0 % del PIB—; de acuerdo con Kühne et al. (2019), se ha avanzado pero aún falta mucho por hacer.

Por otra parte, según García-Ochoa y Graizbord (2016), aproximadamente el 37 % de los hogares mexicanos se encuentra en pobreza energética, además de que 14.6 % utiliza fuentes de energía no limpia, entre las que se encuentran combustibles sucios altos en emisiones como el carbón, biomasa en general, estiércol y/o queroseno; resalta asimismo que en las primeras dos décadas del siglo XXI el crecimiento de los precios de la energía ha sido mayor a la tendencia de alza de la economía en general (Calvo et al., 2021).

En ese sentido, consideramos que nuestro país debe enfocar sus esfuerzos en alcanzar la democracia energética, lo que en buena medida permitirá mejorar el acceso a una energía asequible, segura y sustentable, como una vía para superar la pobreza energética en los hogares. Si atendemos el hecho de que a lo largo del país se cuenta con recursos prácticamente infinitos como irradiación solar y viento, estos pueden ser aprovechados por empresas, cooperativas y ciudadanos para la generación y provisión de energía para la población, particularmente aquella que vive en comunidades aisladas.

Si el Gobierno mexicano realmente está comprometido con la transición y soberanía energética, debiera dar entrada al mercado de energía a nuevos participantes, entre los que se encuentran los ciudadanos y figuras legales como las cooperativas, sin dejar de lado a las organizaciones empresariales. Nos queda claro que en la actualidad no existe impedimento legal para producir energía eléctrica para el autoconsumo, sino que la barrera a la entrada está en la comercialización de la misma, manifiesta en el monopolio que aún disfruta la Comisión Federal de Electricidad (CFE);<sup>2</sup> en caso de que se dé esta apertura en los próximos años, tendría impactos positivos en la producción de energía de fuentes limpias (solar, eólica, biomasa), en el ingreso de los productores individuales y comunitarios, así como en la economía en su conjunto a través de la creación de empleos y de productos específicos para el sector energético (paneles solares, aerogeneradores, etc.).

Considerando este marco, el propósito del presente documento es en varios sentidos. En un primer momento, se documentan de forma breve algunos indicadores vinculados con la producción de energía en México y en el mundo, seguido por una breve revisión de la literatura asociada al concepto de democracia energética; en un tercer apartado, identificamos la legislación del país en términos del sector energético, y dentro de este, cuál es el papel que juegan los ciudadanos y grupos de la sociedad civil en términos de los proyectos e iniciativas energéticas. Asimismo, mostramos algunos ejemplos de éxito en la producción y comercialización de energía eléctrica a nivel mundial; finalmente, se hace un análisis de dónde estamos en términos de democracia energética para alcanzar los compromisos de transición energética y se presentan las consideraciones finales.

---

2 La Ley de la Industria Eléctrica lo dejaba muy claro en su artículo 2: “La planeación y el control del Sistema Eléctrico Nacional, así como el Servicio Público de Transmisión y Distribución de Energía Eléctrica, son áreas estratégicas. En estas materias el Estado mantendrá su titularidad, sin perjuicio de que pueda celebrar contratos con particulares en los términos de la presente”. Véase asimismo los artículos 4 y 8 de la citada ley.

## Indicadores asociados a la producción y consumo de energía en México y el mundo

La utilización de distintas fuentes de energía ha sido una constante desde la aparición del ser humano en la Tierra; sin embargo, en el último siglo, con el avance de los medios de transporte y el mejoramiento de las condiciones de vida de buena parte de la población —lo que a su vez es resultado del crecimiento económico—, se ha registrado un aumento persistente en la producción y consumo de la energía. En ese sentido, la Tabla 1 muestra la evolución reciente de la producción de energía en general y de energía eléctrica en particular de los países que ocupan los primeros siete lugares en el primer caso, y de las primeras cinco posiciones en el segundo.

**TABLA 1.** Indicadores de producción de energía y energía eléctrica

Producción de energía (megatoneladas de petróleo equivalente -Mtoe-)							
País/año	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021
China	2 506	2 360	2 547	2 601	2 728	2 795	2 947
Estados Unidos	2 028	1 921	1 999	2 164	2 316	2 153	2 205
Rusia	1 334	1 374	1 429	1 484	1 530	1 425	1 516
Arabia Saudita	649	671	647	665	640	611	615
India	527	539	551	577	580	568	610
Canadá	473	486	518	539	537	516	536
Indonesia	406	414	426	451	470	nd	451
Producción de energía eléctrica (teravatios hora -TWh-)							
País/año	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021
China	5 854	5 854	6 715	7 143	7 504	7 782	8 537
Estados Unidos	4 317	4 317	4 286	4 455	4 392	4 265	4 381
India	1 357	1 357	1 509	1 608	1 624	1 592	1 669
Rusia	1 068	1 068	1 094	1 115	1 121	1 087	1 157
Japón	1 059	1 059	1 081	1 068	1 045	1 037	1 030

Fuente: Agencia Internacional de Energía (2022).

Tres elementos importantes destacan del análisis de los valores presentados en la Tabla 1: i) China como un referente importante en la producción de energía y energía eléctrica; ii) en las dos clasificaciones encontramos a tres de los países que conforman lo que se denominaba bloque BRICS: China India y Rusia;<sup>3</sup> y iii) China e India son los dos países con la mayor población del planeta (aproximadamente 15.75 % del total mundial). Este último punto es importante dado que se ha observado un esfuerzo importante por llevar energía eléctrica a la mayor parte de ambas naciones, lo que ha hecho necesario incrementar la producción de esta.

Asimismo, es importante documentar que como resultado de la pandemia de COVID-19 en el periodo 2020-2021, la producción mundial de energía registró un retroceso de 4.1 % durante el 2020, recuperándose un 3.4 % durante el año 2021, principalmente por incrementos en la producción de gas natural (4.0 %, particularmente en Rusia y los Estados Unidos) y carbón (5.7 %, mayormente en China, India e Indonesia).

Otro punto importante que vale la pena mencionar está dado por la evolución positiva en la utilización de fuentes de energía renovable (FER) para la generación de energía, tendencia que parece no se detendrá en los próximos años y que, asimismo, obedece a dos elementos: i) la finitud de los combustibles fósiles (y/o en su caso, una distribución geográfica desigual); y ii) el compromiso de la mayoría de las naciones de reducir (y eliminar) el uso de combustibles fósiles para la producción de energía y con ello minimizar los impactos negativos del calentamiento global. En ese sentido, los primeros cinco lugares de países que produjeron energía eléctrica a través de fuentes renovables durante el 2021 estuvieron representados por Noruega (donde 99 % del total de la energía eléctrica provino de FER), Nueva Zelanda (81 %), Brasil (78 %), Colombia (75 %) y Canadá (68 %). Es interesante notar que la generación de energía eléctrica a través de fuente solar (fotovoltaica) y eólica representaron 10.7 % de la oferta energética mundial en el 2021, destacando los casos de España (33 %), Portugal (31 %) y Alemania (29 %).

3 Brasil, otro miembro de BRICS, se encuentra entre los primeros diez lugares en ambas clasificaciones.

En el caso de México, los valores del análisis previo aparecen en la Tabla 2. Si llevamos a cabo una comparación, la producción de energía en México representa tan solo el 6.34 % de la producción de China, y el 5.98 % en términos de la producción de energía eléctrica. De forma importante en la Tabla 2 se refleja el hecho de que, similar a lo ocurrido a nivel internacional con el COVID-19, se observó una menor producción de energía eléctrica en el periodo 2019-2020, tendencia que se ha recuperado durante el 2021; aunado a lo anterior, se destaca el hecho de que las fuentes renovables participen con el 22 % de la generación de energía eléctrica en el país.

**TABLA 2.** México: producción de energía, energía eléctrica y FER

Año	Energía	Energía eléctrica	FER (%)	Solar/eólica
2015	190	311	15.3	4.9
2016	180	321	15.3	5.3
2017	165	322	16.0	5.4
2018	160	358	15.2	8.9
2019	150	344	16.0	12.4
2020	155	338	19.2	14.6
2021	159	350	21.9	15.2

Fuente: Agencia Internacional de Energía (2022).

A pesar de la evolución positiva que muestra la Tabla 2, un análisis de la Secretaría de Energía (Sener, 2021) documenta que en México durante el 2020 se presentó un índice de independencia energética (relación que existe entre la producción y la oferta interna bruta de energía) menor a uno (0.83), lo que implica que se dependió de las importaciones para cubrir la oferta interna bruta.

Cabe mencionar que la mayor parte de la energía primaria en el país provino del petróleo crudo (55.2 %), seguido del gas natural (22.2 %); en términos del consumo, el sector industrial representó el 32.4 %, seguido por el sector de transporte con 38.9 %, el residencial con 24.5 % y el restante correspondió al consumo en el sector agropecuario. Otro elemento

a considerar está dado por el consumo de energía a nivel residencial, que se asocia a lo que en el siguiente apartado tiene que ver con el concepto de democracia energética, que durante el año 2020 provino en un 31.4 % de la electricidad, 30.0 % del gas licuado y 30.8 % del consumo de leña. Lo anterior pudiera documentar varios aspectos que podrían representar líneas de investigación futura: ¿Por qué una alta proporción de los hogares en el país siguen utilizando leña como fuente de energía? ¿No existen líneas de distribución de electricidad (por red) o gas licuado (por red de tuberías o sistema de transporte) en esos hogares? O por el contrario, ¿no se cuenta en los hogares con electrodomésticos que pudieran hacer uso de estas fuentes? ¿O es el acceso “gratuito” a la leña en áreas rurales lo que determina su uso? Esto último podría asociarse a una cuestión de nivel de ingreso para la adquisición de tales electrodomésticos o el precio del gas y la energía eléctrica.

Son estas algunas de las preguntas que en buena medida ponen en la discusión conceptos asociados a la democracia y justicia energética, propiedad comunitaria de la energía y de empoderamiento de los consumidores en los procesos de toma de decisiones referidos a los proyectos de generación de energía y el tipo de fuente de la cual se puede obtener. En ese sentido, en el siguiente apartado se hace una breve descripción acerca de lo que a nivel internacional se ha estado discutiendo en los últimos 15 años de forma más puntual relacionado con la democracia energética, que en el caso mexicano, puede ser un proceso lento ante el papel monopólico que juega el Estado en la producción y distribución/comercialización de la energía.

## El elusivo concepto de democracia energética

Con base en los distintos autores revisados, podría decirse que el concepto de democracia energética es relativamente nuevo, debido a que este empieza a generalizarse a partir de la década de 2010 (Szulec-

ki y Overland, 2020). Siguiendo a Martínez (2020), este es un término que emerge como un campo de investigación independiente en Europa y América del Norte a partir del año 2012. Por ende, al ser un concepto reciente, no existe un consenso en la literatura acerca de su definición, dado los pocos años que lleva como temática en específico.

En ese sentido y de acuerdo con Stephens (2019), el concepto de democracia energética tiene que ver con la naturaleza política de la transición energética y con una preocupación acerca de quiénes son los que controlan los medios de producción de la energía y su consumo, mientras que para Williams y Sovacool (2020) este representa los intentos de alcanzar procesos de toma de decisiones más democráticos y de la misma forma, una mayor propiedad comunitaria de sistemas de energía los cuales comúnmente han estado centralizados. En el mismo tenor, para Delina (2018) el concepto de democracia energética tiene que ver con un movimiento social emergente que transforma a los consumidores en *prosumidores*<sup>4</sup> o innovadores, diseñadores y analistas quienes se involucran en las decisiones que se toman en cada fase, que va desde la producción de energía hasta su utilización.

Para Burke y Stephens (2017) se trata de un concepto novedoso y un movimiento social emergente que conecta el cambio en la infraestructura energética con las posibilidades de profundas transformaciones políticas, económicas y sociales. Para Becker y Naumann (2017), se refiere a los llamados políticos por y para la institucionalización de más formas de participación en la provisión de energía y su gobernanza, mientras que para Szulecki (2018) representa un objetivo político ideal en el cual los ciudadanos son los destinatarios, las partes interesadas (como consumi-

---

4 Desde el enfoque de la demanda, un usuario final de energía se transforma de consumidor pasivo a prosumidor activo, en un contexto de transición hacia formas de energía más sostenibles debido a que producen, almacenan, consumen, utilizan y gestionan la energía (Su et al., 2024; Hu y Chuang, 2023). En su mayoría el prosumidor de energía es un consumidor que produce electricidad directamente y vende el excedente de electricidad después del consumo a través de una compañía de energía eléctrica (Jueon et al., 2023).

dores/productores) y los titulares de cuentas de la política energética de todo el sector.

En buena medida, la expansión del concepto de democracia energética puede asociarse al hecho de que a nivel global se cuenta con una infraestructura envejecida para la generación de energía, de la mano de recursos energéticos limitados (incluso si estos son abundantes, se encuentran distribuidos geográficamente de manera desigual), con implicaciones políticas fundamentales y con la aparición de distintas externalidades negativas asociadas a la producción de energía, entre las que se encuentran el cambio climático, afectaciones a la salud pública y a la calidad del agua, entre otros aspectos. En gran parte, estos elementos han incentivado un proceso de transformación innovador centrado en la descarbonización del sistema energético de la mano de un mayor despliegue de fuentes de energía renovable (Szulecki, 2018).

En ese marco, Wahlund y Palm (2022) argumentan que el concepto de democracia energética forma parte importante del debate sobre transición energética y una mayor demanda de un sistema energético descentralizado, basado en energías renovables y una mayor propiedad local de la energía. De la misma forma, este concepto tiende a centrarse en procesos de institucionalización de nuevas formas de gobernanza participativa y, donde comúnmente los agentes centrales del cambio están representados por los colectivos. Se trata pues, de un concepto donde se busca una participación ciudadana activa, un mayor apoyo de iniciativas locales de generación de energía, la adopción de tecnologías renovables y una amplia participación en los procesos de toma de decisiones políticas en el sector.

Basándonos en esta premisa, podemos argumentar que el concepto se relaciona con una ampliación del rol de los prosumidores individuales, las cooperativas energéticas y la gestión municipal de ciertas funciones que anteriormente estaban a cargo de las compañías energéticas. De acuerdo con Szulecki (2018), se hace un énfasis en aspectos redistributivos de la producción y el consumo de energía, el empoderamiento, la

participación y alguna noción de equidad y legitimidad, así como la sostenibilidad ambiental.

Para Martínez (2020), los proyectos asociados a la producción de energía con finanzas y propiedad democrática pueden ser agrupados en tres amplias categorías: neoliberales, estatistas y comunitarias, que a su vez comparten cinco principios: descarbonización, descentralización, digitalización, democratización y equidad. De acuerdo con Morris y Jungjohann (2016), la democracia energética es cuando los ciudadanos pueden producir su energía, incluso si eso daña financieramente a las empresas productoras de energía; asimismo, es algo que actualmente se persigue principalmente en Dinamarca y Alemania, pero que puede extenderse por todo el mundo, además de que el beneficio comúnmente pasado por alto de este proceso es el papel de las fuentes de energía renovable en la lucha contra el cambio climático, y finalmente, algo para luchar como el camino hacia una mejor calidad de vida con comunidades más fuertes y mejores relaciones personales.

La democracia energética también implica dar acceso a la electricidad a más personas; sin embargo, de acuerdo con Dioha et al. (2022):

... en el año 2022, alrededor de 770 millones de personas no tenían acceso a la electricidad a nivel mundial. Más revelador es que 2 600 millones de personas usan estufas de leña, carbón, estiércol y queroseno para cocinar en el interior, lo que provoca aproximadamente 2.5 millones de muertes prematuras por humo cada año. (p. 51)

En el caso de México, 98.0 % de las viviendas habitadas cuentan con electricidad (el 2.0 % restante corresponde a 372 360 hogares, de los cuales 77.0 % se ubican en localidades rurales). Resalta que solo 0.15 % de las viviendas utilizan energía solar como fuente alternativa, ya sea de forma exclusiva o en sistema bidireccional o híbrido, es decir, se cuenta con conexión a la red pública y sistemas fotovoltaicos (INEGI, 2018).

Lo que se necesita en estos casos es la democratización de la energía en la fase de provisión pública, lo que permitiría garantizar a todas las

personas y en particular a los hogares de bajos ingresos y grupos sociales marginados un acceso adecuado a los servicios energéticos, aunque en algunos casos se trata de una tarea difícil pues se requiere de esfuerzos y compromisos importantes para lograr la cobertura universal de electricidad (Aluko et al., 2023; Falchetta et al., 2021; Shyu, 2021). Habría que agregar que debido a las tasas de crecimiento recientes de la población, en particular para América Latina y El Caribe, la universalización del acceso a la electricidad es todo un desafío, aunque de la misma forma, se cuestiona si los gobiernos han priorizado este tema en sus agendas (Alegre-Bravo y Anderson, 2023).

El aprovisionamiento en las zonas rurales puede cubrirse con energía solar y eólica. La posición geográfica de México le permite recibir cantidades de irradiación considerable, la cual es susceptible de ser aprovechada por algunos territorios para en principio autoabastecerse con energía renovable, además de que esta podría ser exportada al interconectarse a la red nacional por tierra o mediante cable submarino (Molina-Pfennig y González-Baheza, 2020). Destaca el hecho de que el uso de plantas termosolares en procesos industriales se traduce en ahorros económicos y de combustible, así como beneficios medioambientales (César-Munguía et al., 2023).

## **El concepto de democracia energética en la legislación mexicana**

---

A partir del análisis realizado en la sección anterior sobre las diversas interpretaciones del concepto de democracia energética es posible destacar ciertos elementos clave que funcionan como un marco de referencia. Estos permiten analizar su reflejo dentro de la legislación mexicana en el ámbito energético. Es relevante señalar que estos elementos se organizan en dos dimensiones principales: la primera, relacionada con la transición energética, enfoca los procesos de descarbonización, la implementación de fuentes de energía alternativa y la incorporación de tec-

nología renovable. La segunda dimensión aborda la democratización del sector energético, caracterizada por prácticas de toma de decisiones democráticas, la propiedad comunitaria de los sistemas de energía —ya sea por medio de colectivos de la sociedad civil o instituciones tanto públicas como privadas— y un incremento en la participación ciudadana en la provisión de energía y en su gobernanza. En resumen, en esta última dimensión, se trata simplemente de una apertura del sector eléctrico a nuevos participantes y que sean estos quienes determinen las fuentes y usos de la energía generada (autoconsumo y/o comercialización).

Para este apartado se revisan la Ley para el Aprovechamiento de Energías Renovables y el Financiamiento de la Transición Energética, la Ley General de Cambio Climático, la Ley de la Industria Eléctrica, la Ley de Transición Energética, el Plan Nacional de Desarrollo, el Programa Sectorial de Energía 2019-2024 y el Programa Nacional para el Aprovechamiento Sustentable de la Energía 2020-2024. El análisis se estructura en dos segmentos clave: inicialmente, se detallan los propósitos específicos de las distintas leyes y reglamentos; una etapa subsiguiente se enfoca en identificar elementos vinculados con la transición energética y la democracia energética. Este último aspecto pone especial énfasis en la existencia de una mayor participación de entidades privadas y organizaciones de la sociedad civil en el ámbito energético.

### **Legislación mexicana para la transición energética**

A lo largo de los primeros años de este nuevo siglo, el Gobierno mexicano ha puesto en práctica un conjunto de leyes que incentivan procesos de tránsito hacia la sustentabilidad energética. En ese marco, en el año 2008 se promulgó la Ley de Promoción y Desarrollo de los Bioenergéticos (DOF, 2008b) cuya intención era contribuir al desarrollo sustentable y a la diversificación energética mediante la promoción en la producción de insumos para bioenergéticos, con base en las actividades agropecuarias, forestales, procesos biotecnológicos y enzimáticos y la producción de algas.

En ese mismo año se promulga la Ley para el Aprovechamiento de Energías Renovables y el Financiamiento de la Transición Energética (LAERFTE) (DOF, 2008a), que busca promover la eficiencia y sustentabilidad energética, así como la reducción de la dependencia en hidrocarburos como fuente primaria de energía. Cuatro años más tarde, en el 2012, se emite la Ley General de Cambio Climático (LGCC) (DOF, 2012), cuyo objetivo es garantizar el derecho a un medioambiente sano, desarrollo sustentable, así como la preservación y restauración del equilibrio ecológico. Esta ley tiene como fin orientar el desempeño de México hacia una economía baja en carbono, y en ese sentido, se asumió como meta disminuir 30 % las emisiones de contaminantes en el año 2020 respecto a las existentes en el 2000, reducción que alcanzaría un valor de 50 % para el año 2050. A la par de lo anterior, se plantea el objetivo de alcanzar al menos un 35 % de generación de energía eléctrica proveniente de energías limpias para el año 2024.

En 2013 se realiza una reforma constitucional en materia energética que se reglamenta en 2014 con la Ley de la Industria Eléctrica (DOF, 2014a), la cual modifica el régimen del sector eléctrico para transitar a un modelo de libre competencia en actividades de generación y comercialización, con lo que se busca ofrecer a la ciudadanía servicios energéticos de manera más eficiente. Pero al mismo tiempo, impulsa la participación de la ciudadanía y organizaciones privadas en la generación de energía al incluir en la Ley del Impuesto Sobre la Renta (en su artículo 34 fracción XIII, disposición vigente desde 2014) un incentivo fiscal que permite deducir el 100 % de las inversiones en maquinaria y equipo para la generación de energía proveniente de fuentes renovables o de sistemas de cogeneración de electricidad eficiente (DOF, 2013).

Además se incluyen los Certificados de Energías Limpias (CEL), que son instrumentos de promoción de nuevas inversiones en energías limpias y corresponderá a la Secretaría de Energía la emisión de las obligaciones para adquirir CEL. A la par de lo anterior, establece que el Centro Nacional de Control de Energía (Cenace) será el organismo encar-

gado de recibir las ofertas y calculará los precios de energía eléctrica, además de facturar los pagos que correspondan a los integrantes de la industria eléctrica.

En el año 2014 se emite la Ley de Energía Geotérmica (DOF, 2014b), cuyo propósito es regular la exploración y explotación de recursos geotérmicos para el aprovechamiento de la energía térmica del subsuelo. Además, establece las reglas para el registro y reconocimiento de los permisos de exploración, así como concesiones de explotación. En el 2015 se publica la Ley de Transición Energética (DOF, 2015), la cual define las bases legales para la transformación hacia un modelo energético y económico sustentable en el largo plazo por medio del Programa Especial de la Transición Energética (PETE) y el Programa Nacional para el Aprovechamiento Sustentable de la Energía (Pronase).

Puede decirse que con las leyes descritas, México estaba transitando hacia la democracia energética, sin embargo, en el 2018 el Gobierno decidió dar reversa y favorecer a los combustibles fósiles sobre las energías renovables. Se destaca que recientemente la Comisión Reguladora de Energía (CRE) publicó un acuerdo para la regulación de la energía libre de combustibles (DOF, 2023c), donde se plantea que se considere como energía libre de CO<sub>2</sub> a la generada con el vapor de los ciclos combinados a gas natural, es decir, se modifica la regulación y las definiciones de energía limpia para incluir en esta categoría procesos y combustibles que producen contaminantes, los cuales representan riesgos para la salud de la población mexicana y contribuyen al calentamiento global. Estos últimos cambios han derivado en un retroceso en la participación de las energías limpias en la matriz de generación y se ha potenciado el riesgo de incumplimiento del objetivo de generar 35 % de energía limpia en 2024 en el marco del Acuerdo de París.

## La democracia energética y el marco legal de la energía en México

Una vez revisada la normatividad vigente referida al sector energético del país, enseguida se hace una descripción de los elementos puntuales de democracia energética documentados previamente y que se mencionan en tales leyes y reglamentos.

En ese sentido, la LAERFTE específica en el capítulo III, artículo 11 que “La Secretaría de Energía elaborará y coordinará la ejecución del Programa, para lo cual deberá: I. Promover la participación social<sup>5</sup> durante la planeación, aplicación y evaluación del Programa, de conformidad con lo establecido por la Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos y los demás ordenamientos aplicables” (DOF, 2008a).

En el caso de la LGCC, aprobada en el 2012, se define en el artículo 7 que una de las atribuciones de la federación es la de: “III. Formular, conducir y publicar, con la participación de la sociedad, la Estrategia Nacional, el Programa, y las contribuciones determinadas a nivel nacional, así como llevar a cabo su instrumentación, seguimiento y evaluación” y “XII. Promover la participación corresponsable de la sociedad en las materias previstas en esta ley”. En el artículo 26 del capítulo I se especifica que: “En la formulación de la política nacional de cambio climático se observarán los principios de: II. Corresponsabilidad entre el Estado y la sociedad en general, en la realización de acciones para la mitigación y

5 La participación social y la participación ciudadana son conceptos estrechamente relacionados, pero tienen enfoques y ámbitos de aplicación distintos. En ese sentido, la participación social es aquella en la cual los individuos pertenecen a asociaciones u organizaciones para defender los intereses de sus integrantes, pero el Estado no es el principal locutor, sino otras instituciones sociales (Villarreal, 2010); esta se caracteriza por iniciativas en las que las personas se involucran conscientemente en un espacio, sumándose a grupos para tener presencia en la esfera pública y demandar cambios o reclamar situaciones específicas (Menéndez y Spinelli, 2024). Ahora bien, la participación ciudadana para Serrano (2015) es aquella donde la sociedad posee una injerencia directa con el Estado, y esta participación está muy relacionada con el involucramiento de los ciudadanos en la administración pública. Los mecanismos de democracia directa (iniciativa de ley, referéndum, plebiscito y consultas ciudadanas), la revocación de mandato y la cooperación de los ciudadanos en la prestación de servicios o en la elaboración de políticas públicas, son formas de participación ciudadana.

adaptación a los efectos adversos del cambio climático; IV. Prevención, considerando que esta es el medio más eficaz para evitar los daños al medioambiente y preservar el equilibrio ecológico ante los efectos del cambio climático; VII. Participación ciudadana, en la formulación, ejecución, monitoreo y evaluación de la Estrategia Nacional, planes y programas de mitigación y adaptación a los efectos del cambio climático”. Finalmente, plantea en el artículo 51 un Consejo de Cambio Climático, el cual “es el órgano permanente de consulta de la comisión, se integrará por mínimo 15 personas provenientes de los sectores social, privado y académico, con reconocidos méritos y experiencia en cambio climático, que se designarán por la Presidencia de la comisión, a propuesta de las personas que la integren y conforme a lo que al efecto se establezca en su Reglamento Interno, debiendo garantizarse el equilibrio entre los sectores e intereses respectivos y el principio de paridad de género” (DOF, 2012).

En la Ley de la Industria Eléctrica aprobada en el 2014 se plantean distintas estrategias para la participación social en proyectos del rubro energético. En distintos apartados del artículo 11 se especifica lo siguiente: “VIII. Llevar a cabo los procedimientos de consulta, y resolver sobre las evaluaciones de impacto social para proyectos de infraestructura relacionados con la industria eléctrica; XIX. Establecer obligaciones de cobertura para el Suministro Eléctrico en las comunidades rurales y zonas urbanas marginadas e instrumentar los mecanismos para dirigir recursos económicos a este fin; XXVIII. Prever la participación de testigos sociales en los procesos de negociación relacionados con la adquisición, uso, goce, servidumbre, ocupación o afectación superficial de los inmuebles, predios, terrenos, bienes o derechos necesarios para realizar las actividades de la industria eléctrica, y celebrar convenios de colaboración en relación con lo mismo; XXX. Promover la ocupación temporal, parcial o total, o la limitación de los derechos de dominio de los bienes inmuebles que sean necesarios para llevar a cabo las actividades de la industria eléctrica” (DOF, 2014a).

Asimismo, se establece en distintos artículos de la citada ley lo siguiente: “Artículo 12.- La CRE está facultada para: XVI. Otorgar los Certificados de Energías Limpias; Artículo 113.- El Gobierno Federal promoverá la electrificación de comunidades rurales y zonas urbanas marginadas. Para este efecto, la Secretaría podrá coordinarse con las entidades federativas y los municipios; Artículo 117.- Los proyectos de infraestructura de los sectores público y privado en la industria eléctrica atenderán los principios de sostenibilidad y respeto de los derechos humanos de las comunidades y pueblos de las regiones en los que se pretendan desarrollar; Artículo 118.- La Secretaría deberá informar a los interesados en la ejecución de proyectos de infraestructura en la industria eléctrica sobre la presencia de grupos sociales en situación de vulnerabilidad en las áreas en que se llevarán a cabo las actividades para la ejecución de los proyectos, con el fin de que se implementen las acciones necesarias para salvaguardar sus derechos; Artículo 119.- Con la finalidad de tomar en cuenta los intereses y derechos de las comunidades y pueblos indígenas en los que se desarrollen proyectos de la industria eléctrica, la Secretaría deberá llevar a cabo los procedimientos de consulta necesarios y cualquier otra actividad necesaria para su salvaguarda, en coordinación con la Secretaría de Gobernación y las dependencias que correspondan” (DOF, 2014a).

De la misma manera, se especifica: “Artículo 121.- La Secretaría implementará mecanismos que permitan cumplir la política en materia de diversificación de fuentes de energía, seguridad energética y la promoción de fuentes de Energías Limpias. La Secretaría establecerá las obligaciones para adquirir Certificados de Energías Limpias e instrumentará los demás mecanismos que se requieran para dar cumplimiento a la política en la materia, y podrá celebrar convenios que permitan su homologación con los instrumentos correspondientes de otras jurisdicciones. Artículo 122.- Los requisitos para adquirir Certificados de Energías Limpias se establecerán como una proporción del total de la Energía Eléctrica consumida en los Centros de Carga” (DOF, 2014a).

En el caso del Programa Nacional para el Aprovechamiento Sustentable de la Energía, se plantea que la mayor demanda en el consumo de energía es derivada, por un lado, por el crecimiento poblacional, que requiere mayores necesidades de servicios energéticos, de la mano de una mayor cantidad de servicios y comercios, el incremento en la actividad industrial y, por otro lado, por la necesidad de transportar una cantidad creciente de personas y mercancías a lo largo del país. En términos globales, el programa se enfoca mayormente en una estrategia de eficiencia energética de los distintos actores nacionales (población en general y empresas e instituciones públicas) y la actividad económica.

En el Programa Sectorial de Energía se argumenta que 90 % de la capacidad de generación de energía eléctrica del Sistema Eléctrico Nacional (SEN) corresponde a la Comisión Federal de Electricidad (CFE). En este programa, se plantean “ejercicios de consulta previa libre, informada y culturalmente adecuada a comunidades, pueblos indígenas y afroamericanos para salvaguardar sus intereses y derechos respecto de los proyectos que pretenda desarrollar la industria energética y para proteger los derechos fundamentales de la población conforme al marco jurídico nacional y a los usos y costumbres que corresponden a cada comunidad” (DOF, 2020). Asimismo, se observa que “para lograr la transición energética se promueve la generación de energía aislada o interconectada” (DOF, 2020).

A la par de lo anterior y tomando como referencia el Plan Nacional de Desarrollo dentro del principio rector “no dejar a nadie atrás, no dejar a nadie afuera”, se plantea hacer uso extensivo de energías más limpias, como la expansión de la red eléctrica involucrando a las comunidades en las áreas de influencia de los proyectos y cuando exista presencia de pueblos originarios, estos participarán a través de consultas previas, libres e informadas. Asimismo, y dado que el argumento es que “los energéticos son fundamentales para el desarrollo social y económico de las personas y sus comunidades”, se plantea “combatir la pobreza, dando acceso universal al servicio eléctrico” (DOF, 2019). En el mismo tenor, se vislum-

bra la implementación de “proyectos de colaboración con la CFE, para dotar a las comunidades y poblaciones con energía suministrada por la red eléctrica y puedan generar su propia energía a través de los recursos renovables que se encuentran disponibles en las zonas” (DOF, 2019). De acuerdo con el análisis realizado, el factor que ha “obstaculizado el acceso universal a la energía ha sido, entre otros, la falta de consenso con las comunidades para llevar a cabo los proyectos energéticos” (DOF, 2019).

De la misma forma que el Programa Nacional para el Aprovechamiento Sustentable de la Energía, el Programa Sectorial de Energía (PSE) hace énfasis en la transición energética hacia la generación de electricidad mediante fuentes de energía renovable, y con un poco más de apertura hacia la participación de la sociedad civil y grupos organizados en procesos de consulta para la puesta en práctica de proyectos de generación de energía eléctrica.

De forma puntual, el PSE en el objetivo 5, dentro de su estrategia 5.4 y al interior de esta la línea de acción 5.4.1, plantea “adaptar mejores prácticas de inclusión y participación comunitaria en el desarrollo de proyectos del sector energético” (DOF, 2020). Asimismo, busca “impulsar la implementación de los Planes de Gestión Social que permita la sustentabilidad de los proyectos a través de la ejecución de medidas de mitigación, compensación y de maximización de los impactos sociales” (DOF, 2020).

En lo que concierne al Plan Nacional de Desarrollo, este solo hace una breve referencia al sector de energía y especifica que “la nueva política energética del Estado mexicano impulsará el desarrollo sostenible mediante la incorporación de poblaciones y comunidades a la producción de energía con fuentes renovables, mismas que serán fundamentales para dotar de electricidad a las pequeñas comunidades aisladas que aún carecen de ellas y que suman unos dos millones de habitantes. La transición energética dará pie para impulsar el surgimiento de un sector social en el ramo, así como para alentar la reindustrialización del país” (DOF, 2019).

Si bien es cierto que la legislación reciente en materia energética plantea la participación de grupos de la sociedad civil y de la sociedad en general, aún queda por verse la presencia efectiva de estos en los procesos de toma de decisiones. Asimismo, la distinta normativa asociada a la energía en el país descansa en tres principios: i) llevar electricidad a la mayor parte de la población, es decir, tratar de alcanzar la cobertura universal; ii) una mayor participación de agentes económicos que comúnmente no eran tomados en cuenta en los procesos de toma de decisiones para proyectos de generación de energía (sociedad civil, comunidades rurales, grupos indígenas, etc.); y iii) un proceso de descarbonización, mediante la utilización de fuentes de energía renovable o fuentes limpias en la generación de energía eléctrica.

## La democracia energética en la práctica

---

Uno de los distintivos de la democracia energética en el mundo es la participación de la ciudadanía en la toma de decisiones y como prosumidores siendo parte de las comunidades o cooperativas de energía, mismas que mayormente se desempeñan en comunidades rurales, para dar servicio a poblaciones que no tendrían otro método para obtener estos recursos renovables.

Alemania ha sido pionero en el tema de democracia energética por las innovaciones técnicas, el marco legal y los modelos de negocios, mismos que son de interés para otros países que impulsan un amplio uso de las energías renovables; se destaca a las cooperativas de energía<sup>6</sup> como un componente importante en la transición energética en ese país (Yildiz et al., 2015). Asimismo, de acuerdo con Morris y Jungjohann (2016), Alemania es el único país en el mundo cuya transición hacia fuentes de energía renovables es rumbo a la democracia energética, y de forma importante, documentan que fueron los ciudadanos de ese país quienes lo-

---

6 La ley cooperativa de Alemania entró en vigor en 1889 y cubre todo tipo de cooperativas.

graron que su gobierno respaldara una política que la sociedad deseaba: empoderamiento de la comunidad y energía renovable; en otras palabras, democracia energética.

Para el año 2050, Alemania tiene como objetivo demostrar que una potencia industrial puede prescindir de la energía nuclear incluso cuando reduce el consumo de combustibles fósiles —en parte gracias a la eficiencia— a niveles bajos. Y por supuesto que ya han puesto manos a la obra, así por ejemplo, en el año 2012 casi la mitad de las nuevas inversiones en energía solar, biomasa y eólica provenían de ciudadanos y cooperativas de energía, mientras que inversionistas institucionales como bancos, compañías de seguros y proveedores de energía municipales constituyeron la mayor parte de la otra mitad (Morris y Jungjohann, 2016).

Un punto importante que destacan Morris y Jungjohann (2016) es que la transición hacia fuentes de energía renovable por parte de las empresas tradicionales de generación de energía (combustibles fósiles, nuclear) presenta un reto que es financiero y no técnico, y que la solución al mismo es una cuestión meramente política. Contrario a lo que ocurre en otros países, son las comunidades y las cooperativas de energía de ciudadanos en Alemania las referentes en términos de la transición energética. En muchos países, el Gobierno restringe la competencia en el sector energético al no permitir la entrada de nuevos proveedores de electricidad y en caso de que se vean envueltos los ciudadanos, no les permite vender en el mercado el exceso de electricidad generada.

La promulgación en el año 2000 de la Ley de Energía Renovable (EEG) estableció tarifas de alimentación (FIT)<sup>7</sup> que convirtieron a las cooperativas energéticas alemanas en oportunidades de inversión lucrativas

---

7 En 2014 se enmienda la EEG para eliminar gradualmente las FIT, se introducen las subastas y procedimientos de licitación para la producción de electricidad renovable, que obligó a cambiar los modelos de negocio. En 2016 se emite el documento *Licitaciones para financiación de plantas de energías renovables. Documento de cuestiones clave*, en el cual se otorgan facilidades a las cooperativas energéticas para su participación en los procedimientos de licitación, así como para aliviar algunas restricciones y requisitos impuestos.

y sin riesgos. Este proceso se fortaleció en el 2006 con la enmienda a la Ley de Cooperativas Alemanas (GenG), la cual facilita el establecimiento de nuevas cooperativas (Klagge y Meister, 2018). A nivel gubernamental se creó la Oficina Nacional de Cooperativas de Energía, que asesora legalmente a estas organizaciones, las representa en el debate político federal, ofrece apoyos para desarrollar modelos de negocios e implementar proyectos y busca la transferencia de conocimientos y mejores prácticas.

Energiegenossenschaft Odenwald eG es un caso alemán de éxito, cooperativa fundada en 2009 que cuenta con más de 3 000 miembros de Odenwaldkreis, distrito de Hesse. Ha invertido 50 millones de euros en 83 plantas solares instaladas en tejados y campos. Participa en cuatro plantas de energía eólica que en conjunto tienen 11 aerogeneradores, además cuenta con una red de calefacción local en Erbach y cogeneración en Griesheim. Asimismo, construyó una planta combinada de calor y electricidad (CHP) que fue entregada a la ciudad de Griesheim en 2015. Y finalmente, también se ocupa del desarrollo regional, incluida la construcción de propiedades energéticamente eficientes y espacios comunitarios (Energiegenossenschaft Odenwald eG, 2022).

En Países Bajos las cooperativas locales de energía emergen en 1980, especializándose primeramente en la generación de energía eléctrica a través de fuentes eólicas y posteriormente incorporaron la energía solar. Al principio se vieron como experimentos para generar electricidad, gas y calor renovables, y los éxitos de Deltawind y TexelEnergie en términos de contribución a la transición energética o innovación radical son representativos de estas organizaciones (Hufen y Koppenjan, 2015). Para el año 2014 operaban alrededor de 110 cooperativas de energía cuyo desarrollo era afectado por la incertidumbre en torno a la rentabilidad, por lo cual la Agencia de Evaluación Ambiental de los Países Bajos (PBL) planteó la necesidad de que el Gobierno<sup>8</sup> diseñara y pusiera en práctica

8 El Gobierno pretende que el 70.0 % de su electricidad sea renovable al 2030, principalmente mediante capacidad solar y eólica. Para ello ha establecido en leyes objetivos climáticos impulsando el gasto ecológico. En el 2022 el presupuesto para energías renovables fue de 13 000 millones de euros.

incentivos fiscales a las instalaciones de energía solar y aumentara el alcance financiero, además de que los municipios flexibilizaran los criterios de contratación con este tipo de empresas sociales (Elzenga y Marieke-Schwencke, 2014).

Un caso de éxito en los Países Bajos es GroenLeven, empresa que innovó al aplicar la energía solar flotante, donde uno de sus principios es: lo local es la clave. Colabora con cooperativas energéticas, paisajistas, ecologistas, municipios y provincias para estimular la biodiversidad y la economía local, permitiendo que los residentes participen en debates y se beneficien del parque solar más allá de solo generar energía limpia y renovable, por lo que de igual forma se prioriza una correcta integración paisajística (GroenLeven, 2023).

En el año 2019 el Gobierno de la Comunidad Europea presentó la propuesta de energía limpia para todos, como un medio para acelerar los resultados plasmados en la estrategia de la Unión de la Energía, publicada en el 2015. Con esta nueva normativa se facilita que los ciudadanos sean prosumidores, además de incorporar requisitos de participación y consulta de las partes interesadas para escuchar a la sociedad civil con mayor claridad, así como la participación activa de las autoridades locales y regionales que permita contar con un sistema de energía más descentralizado. Esta es una estrategia de largo plazo con miras a alcanzar la neutralidad de carbono (emisiones netas cero) en el año 2050; en ese sentido, se estima que para el 2030 las comunidades de energía contarán con el 17.0 % de la capacidad eólica instalada y el 21.0 % de la energía solar. De acuerdo con la European Commission (2019), este cambio donde los consumidores desempeñan un papel activo significa democracia y oportunidades para consolidar las comunidades de energía local y renovable.<sup>9</sup>

En Italia, ènostra fue la primera cooperativa de energía. Inició operaciones en el año 2014 y produce y suministra a sus miembros energía

---

9 Cabe destacar que a raíz de la guerra Rusia-Ucrania varios países europeos han acelerado la transición energética con miras a reducir la dependencia energética del primero.

sostenible, ética y 100 % renovable —con garantía de origen— a través de un modelo de participación e intercambio sin fines de lucro. En 2021 reportó una plantilla de 29 trabajadores, 11 360 miembros y 31.26 GWh de electricidad vendida. En España, Ekiola Kooperatibak es un modelo ciudadano a favor del clima, un conjunto de cooperativas solares para lograr la transición energética donde cada socio es un prosumidor. Opera en tres territorios del País Vasco: Araba (seis proyectos), Bizkaia (un proyecto) y Gipuzkoa (cinco proyectos), impulsando el autoabastecimiento y el fomento de las energías renovables sostenibles. Ejemplos europeos adicionales de democracia energética pueden ser encontrados en Kunze y Becker (2014).

En Estados Unidos opera la Asociación Nacional de Cooperativas Eléctricas Rurales (NRECA), que agremia a cientos de cooperativas donde el 95.0 % se enfoca en energía eléctrica renovable, ya sea generando o adquiriendo para llevarla a pequeñas comunidades y regiones rurales. Se destaca que representa más del 33 % del sector y presta sus servicios a 42 millones de personas, lo que significa aproximadamente uno de cada ocho estadounidenses (NCBA CLUSA, 2022).

Como se ilustró en apartados anteriores, en México no existen instrumentos legales específicos para impulsar a las cooperativas de energía sustentable, pero estas se podrían desarrollar a partir de la figura de generación distribuida. La Ley de la Industria Eléctrica define a la generación distribuida como la generación de energía eléctrica que se realiza por una central eléctrica que no requiere permiso (es decir, que tenga una capacidad instalada menor a 0.5 MW) y está interconectada a un circuito de distribución con centros de carga.

Como ejemplo se puede mencionar el Proyecto Servicios Integrales de Energía (PSIE) que operó de 2012 a 2015, por medio del cual se electrificaron 40 comunidades rurales de Baja California Sur, Chihuahua, Durango, Sonora, Coahuila, Guerrero, Nayarit y San Luis Potosí, en beneficio de 7 735 habitantes. Asimismo, el Banco Nacional de Obras y Servicios Públicos (Banobras), institución fiduciaria del fideicomiso de-

nominado Fondo Sectorial Conacyt-Secretaría de Energía-Sustentabilidad Energética, ha impulsado la electrificación de comunidades rurales. Por ejemplo, en Baja California se tiene el caso de Puertecitos, localidad beneficiaria del proyecto Microred Sustentable de Servicios Energéticos Comunitarios, que provee electricidad a 50 familias. Sin embargo, persisten algunas comunidades rurales en aislamiento geográfico que no están conectadas a la red eléctrica nacional, lo que afecta a aproximadamente 3.5 millones de personas, pero aprovechando las fuentes renovables como son el sol y viento se posibilita el suministro por medio de cooperativas de energía sustentable (Banco Mundial, 2017; Sener, 2015).

En el año 2021 se dio a conocer la *Hoja de ruta sobre modelos de negocio comunitarios y cooperativos de energía sustentable* (INAES, 2022), con la cual se busca promover la participación de poblaciones y comunidades en la transición energética mediante modelos de economía social. En ese mismo año se desarrollaron seis experiencias piloto en Sonora, Jalisco, Puebla, Ciudad de México y Quintana Roo. A partir de estas experiencias, se integraron materiales que permiten difundir los conocimientos generados y el uso de manuales de intervención con el objetivo de replicar estos procesos en otras partes del país.

## **Reflexiones finales**

---

El análisis realizado en este capítulo revela que el concepto de democracia energética es relativamente reciente, y, por lo tanto, aún no se ha establecido una definición unánime en la literatura especializada. Sin embargo, entre las diversas interpretaciones existentes se pueden identificar algunos elementos comunes. Entre estos destacan la electrificación universal, la transición energética hacia un mayor uso de energías renovables y/o la descarbonización, así como la participación activa y amplia de la sociedad civil, tanto individual como colectiva, en roles de consumidores y productores. Además, se subraya su influencia significativa en procesos de decisión relativos a nuevos proyectos de generación de ener-

gía, tanto eléctrica como calorífica, la elección de fuentes energéticas y la gestión de la distancia al mercado. Este último aspecto suele relacionarse con la centralización y monopolización del sector energético, resaltando la importancia de una estructura más inclusiva y democrática en la gestión energética.

En Europa es frecuente observar los elementos mencionados anteriormente, siendo Alemania un ejemplo destacado por haber eliminado casi por completo el uso de energía nuclear en la generación de energía eléctrica, un cambio radical inimaginable hace 20 años. Un patrón recurrente en los casos documentados es la iniciativa ciudadana impulsando cambios legales, lo que, por ejemplo, en Alemania ha transformado la generación de energía eléctrica en un símbolo de soberanía energética. Además, se ha convertido en una fuente de ingresos adicional para los hogares y ha fomentado un mayor sentido de comunidad, especialmente en la formación de cooperativas.

Por lo tanto, es evidente que iniciar procesos de transición energética, que benefician económicamente a los prosumidores y reducen las emisiones de gases de efecto invernadero, requiere de voluntad política. Esto indica que las barreras para la transición energética no son ni técnicas ni financieras. En la práctica, la eficiencia de los equipos para generar electricidad a partir de fuentes solar, eólica y de biocombustibles, ha aumentado significativamente, mientras que sus costos han disminuido de manera notable en los últimos años.

Es crucial destacar que iniciar procesos de transición energética sin involucrar a la ciudadanía o sin abrir el mercado entraña un riesgo significativo: el dominio del proceso por parte de las grandes corporaciones energéticas, perpetuando su poder monopólico u oligopólico en detrimento de los consumidores, a través de barreras legales o de entrada como limitaciones en la innovación o financieras. De no abordarse esta situación, Morris y Jungjohann (2016) advierten que para el año 2050, aunque el medioambiente podría estar en mejores condiciones, la estructura social sería menos democrática.

Un caso que ilustra indirectamente esta situación es el alemán, donde el principio de *laissez faire* (dejen hacer, dejen pasar) de Adam Smith sigue siendo relevante. Aquí, los consumidores de electricidad tienen la libertad de cambiar de proveedor mensualmente si sus expectativas no se cumplen, mientras que los proveedores tienen la libertad de fijar sus precios.

Además, la participación ciudadana efectiva requiere de una educación pública orientada hacia el autoaprendizaje, es decir, que los ciudadanos se eduquen continuamente sobre energía y procesos políticos. Esto les permitirá adquirir habilidades aplicables no solo en este ámbito, sino en el futuro en general. Este enfoque contrasta con la práctica actual en México, donde la normativa parece invitar a la inclusión ciudadana en proyectos energéticos más como una formalidad que como una verdadera integración en la toma de decisiones, la cual sigue siendo predominantemente *top-down* (de arriba hacia abajo). Sin embargo, la esencia de la democracia energética reside en fomentar un modelo *bottom-up* (de abajo hacia arriba) en la toma de decisiones. Mantener el *statu quo* en el sector energético mexicano probablemente impedirá alcanzar los objetivos nacionales e internacionales de un medioambiente más limpio y una efectiva transición energética.

En este contexto, para que la transición energética sea exitosa, es fundamental garantizar la participación activa de ciudadanos y comunidades en la adopción de energías renovables y en la implementación de medidas de eficiencia energética. Igualmente, se requiere un compromiso genuino hacia una mayor descentralización y transparencia por parte de las empresas del sector, siendo en México un ejemplo pertinente la Comisión Federal de Electricidad (CFE). Además, es crucial reconocer que la implicación de la ciudadanía en cooperativas energéticas trasciende los beneficios económicos, abarcando la formación de un sentido de comunidad, el desarrollo de habilidades personales y un compromiso político reforzado, entre otros aspectos destacados por Morris y Jungjohann (2016).

Con base en ello, se percibe que la implementación del concepto de democracia energética ha sido insuficiente, posiblemente debido a la ausencia de una definición consensuada y a una comprensión clara del rol ciudadano en este proceso, así como a la falta de voluntad por parte de las autoridades energéticas. A pesar de las causas subyacentes, es evidente que aún queda mucho por avanzar. El primer paso hacia este progreso implica facilitar la participación tanto individual como colectiva de la ciudadanía y del sector privado en los mercados energéticos.

## REFERENCIAS

- Agencia Internacional de Energía. (2022). *World Energy Outlook 2022*. <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2022>
- Alegre-Bravo, A., y Anderson, C. L. (2023). Exploring the influence of multidimensional variables on access to electricity in rural areas of the Global South. *Applied Energy*, 333. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2022.120509>
- Aluko, O. A., Opoku, E. E. O., Ibrahim, M., y Kufuor, N. K. (2023). Put on the light! Foreign direct investment, governance and access to electricity. *Energy Economics*, 119. <https://doi.org/10.1016/j.eneco.2023.106563>
- Atutxa O. E., Aguado Muñoz, R., y Zubero Beascochea, I. (2022). Hacia una transición energética justa e inclusiva: la contribución de la Economía Social a la conformación de las Comunidades Energéticas Europeas. *CIRIEC-España, Revista de Economía Pública, Social y Cooperativa*, 104, 113-141. <https://doi.org/10.7203/CIRIEC-E.104.21474>
- Banco Mundial. (2017, 1 de noviembre). *Comunidades rurales alejadas de la red eléctrica logran acceso a electricidad en México*. <https://www.bancomundial.org/es/results/2017/11/01/switching-on-remote-communities-through-electricity-access-in-mexico>
- Barcena, H. I., Almazán, A., Azurza Zubizarreta, O., Villamor Lomas, E., y Pérez de Arana, I. B. (2023). Democracia energética ante el colapso civilizatorio: comunidades energéticas del Norte y del Sur. *Política y Sociedad*, 60(1), 1-14. <https://doi.org/10.5209/poso.79457>
- Becker, S., y Naumann, M. (2017). Energy democracy: mapping the debate on energy alternatives. *Geography Compass*, 11(8), e12321. <https://doi.org/10.1111/gec3.12321>

- Berthod, O., Blanchet, T., Busch, H., Kunze, C., Nolden, C., y Wenderlich, M. (2023). The rise and fall of energy democracy: 5 cases of collaborative governance in energy systems. *Environmental Management*, 71, 551-564. <https://doi.org/10.1007/s00267-022-01687-8>
- Burke, M., y Stephens, J. (2017). Energy democracy: Goals and policy instruments for sociotechnical transitions. *Energy Research & Social Science*, 33, 35-48. <https://doi.org/10.1016/j.erss.2017.09.024>
- Calvo, R., Álamos, N., Billi, M., Urquiza, A., y Contreras Lisperguer, R. (2021). Desarrollo de indicadores de pobreza energética en América Latina y el Caribe. *Serie Recursos Naturales y Desarrollo*, 207. Cepal. <https://repositorio.cepal.org/server/api/core/bitstreams/f3b3060c-94ab-4128-adaf-d56d2e860836/content>
- César-Munguía, A. L., García-Valladares, O., Pérez-Espinosa, R., y Domínguez-Niño, A. (2023). Hybrid thermosolar-LPG dehydrating plant installed in Xochitepec, México. Case study: Pineapple. *Applied Thermal Engineering*, 225, 120171. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2023.120171>
- Choi, S. Y. (2021). Resilient peripheralisation through authoritarian communication against energy democracy in South Korea. *Environmental Politics*, 30(6), 1002-1023. <https://doi.org/10.1080/09644016.2020.1843884>
- Delina, L. (2018). Energy democracy in a continuum: Remaking public engagement on energy transitions in Thailand. *Energy Research & Social Science*, 42, 53-60. <https://doi.org/10.1016/j.erss.2018.03.008>
- Diario Oficial de la Federación. (2008a). *Ley para el Aprovechamiento de Energías Renovables y el Financiamiento de la Transición Energética*. [https://www.diputados.gob.mx/LeyesBiblio/abro/laerfte/LAERFTE\\_abro.pdf](https://www.diputados.gob.mx/LeyesBiblio/abro/laerfte/LAERFTE_abro.pdf)
- Diario Oficial de la Federación. (2008b). *Ley de Promoción y Desarrollo de los Bioenergéticos*. <https://www.diputados.gob.mx/LeyesBiblio/pdf/LPDB.pdf>
- Diario Oficial de la Federación. (2012). *Ley General de Cambio Climático*. <https://www.diputados.gob.mx/LeyesBiblio/pdf/LGCC.pdf>
- Diario Oficial de la Federación. (2013). *Ley del Impuesto Sobre la Renta*. <https://www.diputados.gob.mx/LeyesBiblio/pdf/LISR.pdf>

- Diario Oficial de la Federación. (2014a). *Ley de la Industria Eléctrica*. <https://www.diputados.gob.mx/LeyesBiblio/pdf/LIElec.pdf>
- Diario Oficial de la Federación. (2014b). *Ley de Energía Geotérmica*. [https://www.diputados.gob.mx/LeyesBiblio/pdf/LEG\\_110814.pdf](https://www.diputados.gob.mx/LeyesBiblio/pdf/LEG_110814.pdf)
- Diario Oficial de la Federación. (2015). *Ley de Transición Energética*. <https://www.diputados.gob.mx/LeyesBiblio/pdf/LTE.pdf>
- Diario Oficial de la Federación. (2019). *Plan Nacional de Desarrollo 2019-2024*. [https://www.dof.gob.mx/nota\\_detalle.php?codigo=5565599&fecha=12/07/2019#gsc.tab=0](https://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5565599&fecha=12/07/2019#gsc.tab=0)
- Diario Oficial de la Federación. (2020). *Programa Sectorial de Energía 2020-2024*. [https://www.dof.gob.mx/nota\\_detalle.php?codigo=5596374&fecha=08/07/2020#gsc.tab=0](https://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5596374&fecha=08/07/2020#gsc.tab=0)
- Diario Oficial de la Federación. (2023a). *Acuerdo número A/018/2023*. [https://www.dof.gob.mx/nota\\_detalle.php?codigo=5690142&fecha=26/05/2023#gsc.tab=0](https://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5690142&fecha=26/05/2023#gsc.tab=0)
- Diario Oficial de la Federación. (2023b). *Acuerdo para la regulación de la energía libre de combustibles*. [https://www.dof.gob.mx/nota\\_detalle.php?codigo=5690142&fecha=26/05/2023#gsc.tab=0](https://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5690142&fecha=26/05/2023#gsc.tab=0)
- Diario Oficial de la Federación. (2023c). *Programa Nacional para el Aprovechamiento Sustentable de la Energía 2020-2024*. [https://dof.gob.mx/nota\\_detalle.php?codigo=5679748&fecha=16/02/2023#gsc.tab=0](https://dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5679748&fecha=16/02/2023#gsc.tab=0)
- Dioha, M. O., Edomah, N., y Caldeira, K. (2022). Fixing the disconnect around energy access. *Issues in Science & Technology*, 38(2), 51-56.
- Droubi, S., Heffron, R. J., y McCauley, D. (2022). A critical review of energy democracy: A failure to deliver justice? *Energy Research & Social Science*, 86. 102444. <https://doi.org/10.1016/j.erss.2021.102444>
- Elzenga, H., y Marieke Schwencke, A. (2014, 2 de junio). *Energy cooperatives: aims, operational perspective and interaction with municipalities*. PBL Netherlands Environmental Assessment Agency. <https://www.pbl.nl/en/publications/energy-cooperatives-aims-operational-perspective-and-interaction-with-municipalities>

- Energiegenossenschaft Odenwald eG. (2022). *Zukunft gemeinsam gestalten*. <https://eg-odenwald.de/>
- European Commission. (2019). *Clean energy for all Europeans*. Publications Office of the European Union, Directorate-General for Energy. <https://data.europa.eu/doi/10.2833/9937>
- Falchetta, G., Dagnachew, A. G., Hof, A. F., y Milne, D. J. (2021). The role of regulatory, market and governance risk for electricity access investment in sub-Saharan Africa, *Energy for Sustainable Development*, 62, 136-150, <https://doi.org/10.1016/j.esd.2021.04.002>
- García-Ochoa, R., y Graizbord, B. (2016). Caracterización espacial de la pobreza energética en México. Un análisis a escala subnacional. *Economía, Sociedad y Territorio*, 16(51), 289-337.
- GroenLeven. (2023). *Energiecoöperaties. Een zonnige samenwerking*. <https://groenleven.nl/energiecooperaties/>
- Hu, J. L., y Chuang, M. Y. (2023). The importance of energy prosumers for affordable and clean energy development: A review of the literature from the viewpoints of management and policy. *Energies*, 16(17), 6270. <https://doi.org/10.3390/en16176270>
- Hufen, J., y Koppenjan, J. (2015). Local renewable energy cooperatives: revolution in disguise? *Energy, Sustainability and Society*, 5(18). <https://doi.org/10.1186/s13705-015-0046-8>
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía. (2018). *Encuesta Nacional de Consumo de Energéticos en Viviendas Particulares*. INEGI. <https://www.inegi.org.mx/programas/encevi/2018/#Tabulados#>
- Instituto Nacional de la Economía Social. (2022). *Hoja de ruta sobre modelos de negocio comunitarios y cooperativos de energía sustentable*. Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit. [https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/721173/Hoja\\_de\\_Ruta\\_sobre\\_modelos\\_de\\_negocio\\_comunitarios\\_y\\_cooperativos\\_de\\_energ\\_a\\_sustentable.pdf](https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/721173/Hoja_de_Ruta_sobre_modelos_de_negocio_comunitarios_y_cooperativos_de_energ_a_sustentable.pdf)
- Judson, E., Fitch-Roy, O., y Soutar, I. (2022). Energy democracy: A digital future? *Energy Research & Social Science*, 91, 102732. <https://doi.org/10.1016/j.erss.2022.102732>

- Jueon K., Jinbin S., Yunwoo S., Jaehyu I., y Sokhee, P. J. (2023). Measures to Promote Energy Prosumer in Photovoltaic Solar Energy. *Journal of Korean Society of Environmental Engineers*, 45(10), 428-440. <https://doi.org/10.4491/KSEE.2023.45.10.428>
- Klagge, B., y Meister, T. (2018). Energy cooperatives in Germany - an example of successful alternative economies? *Local Environment*, 23(7), 697-716. <https://doi.org/10.1080/13549839.2018.1436045>
- Kunze, C., y Becker, S. (2014). *Energy democracy in Europe*. A survey and Outlook. Rosa-Luxemburg-Stiftung. [https://www.rosalux.de/fileadmin/rls\\_uploads/pdfs/sonst\\_publicationen/Energy-democracy-in-Europe.pdf](https://www.rosalux.de/fileadmin/rls_uploads/pdfs/sonst_publicationen/Energy-democracy-in-Europe.pdf)
- Kühne, K., Sanchez, L., Roth, J., Tornel, C., y Gerasimchuk, I. (2019, junio). *Más allá de los combustibles fósiles: transición fiscal en México*. International Institute for Sustainable Development. <https://www.iisd.org/system/files/publications/combustibles-fosiles-transicion-fiscal-en-mexico.pdf>
- Martinez, M. G. J. (2020). *A study of energy democracy in Mexico* [Thesis of Master of Environmental Studies, Graduate Program in Environmental Studies]. Queen's University.
- Menéndez, E., y Spinelli, H. (2024). *Participación social, ¿para qué?* Remedios de Escalada, Universidad Nacional de Lanús. <https://isco.unla.edu.ar/edunla/cuadernos/catalog/book/48>
- Molina-Pfennig, P., y González-Baheza, A. (2020). Evaluación de los recursos de radiación solar en los municipios de Baja California Sur, México, mediante un modelo de aptitud socioambiental. *Región y Sociedad*, 32, e1296. <https://doi.org/10.22198/rys2020/32/1296>
- Morris, C., y Jungjohann, A. (2016). *Energy democracy. Germany's Energiewende to renewables*. Ed. Palgrave Macmillan. <https://link.springer.com/book/10.1007/978-3-319-31891-2>
- National Cooperative Business Association Clusa International (2022, 1 de julio). *The Role of energy cooperatives in advancing clean energy*. NCBA CLUSA. <https://ncbaclusa.coop/blog/the-role-of-energy-cooperatives-in-advancing-clean-energy/>

- Secretaría de Energía. (2015, 24 de julio). *Proyecto Servicios Integrales de Energía*. Sener. <https://www.gob.mx/sener/articulos/proyecto-servicios-integrales-de-energia#:~:text=El%20Proyecto%20Servicios%20Integrales%20de,alejadas%20de%20la%20red%20el%C3%A9ctrica>
- Secretaría de Energía. (2022). *Balance Nacional de Energía*. Subsecretaría de Planeación y Transición Energética, Dirección General de Planeación e Información Energéticas, Sener. <https://base.energia.gob.mx/BNE/BalanceNacionalDeEnerg%C3%ADa2022.pdf>
- Serrano, A. (2015). La participación ciudadana en México. *Estudios Políticos*, 9(34), 93-116. <https://www.redalyc.org/pdf/4264/426439555004.pdf>
- Shyu, C. W. (2021). A framework for 'right to energy' to meet UN SDG7: Policy implications to meet basic human energy needs, eradicate energy poverty, enhance energy justice, and uphold energy democracy. *Energy Research & Social Science*, 79, 102199. <https://doi.org/10.1016/j.erss.2021.102199>
- Stephens, J. C. (2019). Energy democracy: Redistributing power to the people through renewable transformation. *Environment: Science and Policy for Sustainable Development*, 61(2), 4-13. <https://doi.org/10.1080/00139157.2019.1564212>
- Su, Y., Yang, P., Kang, K., Wang, Z., Qi, N., Liu, T., y Liu, F. (2024). Sharing energy in wide area: A two-layer energy sharing scheme for massive prosumers. *Journal of Latex Class Files*, 1(20). <https://arxiv.org/pdf/2401.11090>
- Szulecki, K. (2018). Conceptualizing energy democracy. *Environmental Politics*, 27(1), 21-41. <https://doi.org/10.1080/09644016.2017.1387294>
- Szulecki, K., y Overland, I. (2020). Energy democracy as a process, an outcome and a goal: a conceptual review. *Energy Research & Social Science*, 69, 101768. <https://doi.org/10.1016/j.erss.2020.101768>
- Villarreal, M. (2010). *Participación ciudadana y políticas públicas*. Universidad Nacional Autónoma de México, Red Universitaria de aprendizaje. [https://portalanterior.ieepcnl.mx/educacion/certamen\\_ensayo/decimo/MariaTeresaVillarrealMartinez.pdf](https://portalanterior.ieepcnl.mx/educacion/certamen_ensayo/decimo/MariaTeresaVillarrealMartinez.pdf)
- Wahlund, M., y Palm, J. (2022). The role of energy democracy and energy citizenship for participatory energy transitions: A comprehensive review. *Energy Research & Social Science*, 87, 102482. <https://doi.org/10.1016/j.erss.2021.102482>

- Williams, L., y Sovacool, B. K. (2020). Energy democracy, dissent and discourse in the party politics of shale gas in the United Kingdom. *Environmental Politics*, 29(7), 1239-1263. <https://doi.org/10.1080/09644016.2020.1740555>
- Yildiz, Ö., Rommel, J., Debor, S., Holstenkamp, L., Mey, F., Müller, J. R., Radtke, J., y Rognli, J. (2015). Renewable energy cooperatives as gatekeepers or facilitators? Recent developments in Germany and a multidisciplinary research agenda. *Energy Research & Social Science*, 6, 59-73. <https://doi.org/10.1016/j.erss.2014.12.001>

# CAPÍTULO 10.

## CONSUMO DE ENERGÍA EN EL SECTOR RESIDENCIAL, EFICIENCIA ENERGÉTICA Y OPCIONES DE MITIGACIÓN DE GASES DE EFECTO INVERNADERO

**Rodolfo Díaz Jiménez<sup>1\*</sup>**

<sup>1</sup>Presidente de la Red Mexicana de Bioenergía (2022–2023) y director de la Fundación NUNDUVA

\* rodolfo.diazj@gmail.com

---

### Resumen

**E**n este capítulo se presenta un panorama del consumo de energía en el sector residencial mexicano, a partir de los usos finales o tareas energéticas. Su importancia radica en que es el tercer consumidor de energía en México, solo atrás del transporte y de la industria. El principal consumo de energía de las viviendas en nuestro país es de energía térmica, suministrada por la leña, el gas licuado de petróleo, el gas natural y la energía solar. La electricidad, aunque tiene muchos usos, representa apenas una tercera parte de la energía usada en el sector residencial. El objetivo de este capítulo es revisar el patrón de consumo energético del sector residencial y sus diferencias en el ámbito urbano y rural, así como las medidas de

eficiencia energética realizadas hasta la fecha. Finalmente, se muestran algunas opciones para la mitigación de gases de efecto invernadero mediante el uso de tecnología eficiente.

Palabras clave: **Energía; sector residencial; eficiencia; gases de efecto invernadero; leña; electricidad.**

---

## **Abstract**

This chapter presents an overview of energy consumption in the Mexican residential sector, based on end uses or energy tasks. Its importance lies in the fact that it is the third largest consumer of energy in Mexico, only behind transportation and industry. The main energy consumption of homes in our country is thermal energy, supplied by firewood, liquefied petroleum gas, natural gas and solar energy. Electricity, although it has many uses, represents only a third of the energy used in the residential sector. The objective of this chapter is to review the energy consumption pattern of the residential sector and its differences in urban and rural areas, as well as the energy efficiency measures carried out to date. Finally, some options for mitigating greenhouse gases using efficient technology are shown.

Keywords: **Energy; residential sector; efficiency; greenhouse gases; fuelwood; electricity.**

## Introducción

En la vida cotidiana, a donde volvamos la vista, encontraremos alguna manifestación de la energía, ya sea en su forma calorífica o térmica, luminosa, de movimiento o de trabajo. De acuerdo con Smil (2018, pp. 21-47), “la energía es la única moneda de cambio universal: sin la transformación de energía no hay nada”.

Aunque no existe una definición precisa de la “energía”, todos conocemos sus manifestaciones, beneficios y también sus impactos, ya que aparece en todos los ámbitos de nuestra vida diaria, desde las actividades del hogar, de las organizaciones educativas, productivas, de servicios y de toda la sociedad y por supuesto las del universo en su conjunto.

Para lograr una mayor comprensión del concepto “energía” es mejor partir de sus interacciones. Es decir, la energía está asociada a la interacción entre objetos de todos tamaños, ya sea a escala microscópica o planetaria, entre objetos sólidos, líquidos o gaseosos. La energía puede manifestarse de diferentes formas, como potencial, cinética o química, y su transformación puede producir trabajo. Sabemos que toda la materia es energía en reposo, también que la energía se manifiesta de diferentes maneras, todas ellas unidas entre sí, mediante numerosos procesos de conversión.

Ahora bien, por su origen tenemos a los llamados energéticos primarios, los que se encuentran en la naturaleza, que son el carbón mineral, el petróleo, el gas natural, una masa de agua y una masa de aire; estas últimas deben tener ciertas características para producir energía. También contamos con los energéticos secundarios, que son aquellos que necesitan de la intervención humana para su transformación a partir de los primarios, como la gasolina, el gas LP (licuado de petróleo), la electricidad, el diésel, el biodiésel y muchos más.

La conversión de energía obedece a principios básicos como que cualquier energía puede convertirse en calor (energía térmica), que la energía nunca se pierde, que expresada en la primera ley de la termodinámica se refiere a la conservación de la energía y es una verdad universal.

En los procesos de conversión de la energía el potencial de trabajo útil disminuye constantemente, lo cual se plasma en la segunda ley de la termodinámica, que define a la entropía como la medida asociada con la pérdida de energía útil. Es decir, en cada transformación o transferencia de energía se genera cierta cantidad de energía no útil, que ya no nos sirve, y que generalmente se manifiesta como calor.

En síntesis, la energía es una propiedad de los objetos y está asociada a procesos; es indispensable para la satisfacción de las necesidades básicas de las personas y de la sociedad. La energía participa en la satisfacción de las necesidades humanas esenciales como alimentación, hidratación, cobijo, iluminación, movilidad, actividades productivas y de esparcimiento.

Por lo tanto, este capítulo expone el fuerte vínculo entre el suministro de energía y el progreso social, entre la cantidad y calidad de la energía y el nivel y calidad de vida de las personas, y por supuesto también el impacto ambiental ocasionado en la producción, conversión, transporte y suministro de dicha energía hasta el consumidor final. Todo ello con el fin de mostrar opciones viables para la reducción de la emisión de gases de efecto invernadero mediante el uso de tecnologías eficientes y conectar estas opciones con la sustentabilidad energética.

Este capítulo tiene como objetivo revisar el patrón de consumo energético del sector residencial, las diferencias existentes en el ámbito urbano y rural, así como las medidas de eficiencia energética promovidas y aplicadas por algunas instituciones en años recientes, además de mostrar algunas opciones para la mitigación de gases de efecto invernadero mediante el uso de tecnología eficiente.

## La energía en la historia

La energía acompaña al hombre en sus actividades cotidianas, desde que Prometeo robó el fuego a los dioses, según la mitología griega. De acuerdo con Smil (2018), no se ha encontrado evidencia de la fecha exacta de cuándo la humanidad empezó a usar el fuego de manera controlada, es decir, para cocinar y calentar el ambiente. Sin embargo, existe evidencia reportada por Goudsblom (1995) que sitúan su uso desde hace 250 000 años y posteriormente Goren-Inbar et al. (2004) señalan que fue hace 790 000 años, aunque también existen registros fósiles que indican que se consumieron alimentos cocinados hace 1.9 millones de años.

De lo que sí existe evidencia contundente es que en el Paleolítico superior, hace unos 30 000 o 20 000 años, cuando el *Homo sapiens* desplazó a los neandertales de Europa, el fuego ya se utilizaba de manera generalizada (Bar-Yosef, 2002; Karkanas et al., 2007). Otro hecho irrefutable es que el procesamiento de alimentos mediante el cocinado fue un componente importante de la evolución humana; de hecho, Wrangham (2010) considera que tanto el fuego como el humo están vinculados con el desarrollo del cerebro y de la evolución.

La cocina prehistórica siempre contenía un fuego al aire libre, con carne suspendida sobre las llamas (ahumado y deshidratado), o enterrada en brasas calientes (horneado), colocada sobre rocas calientes (barbacoa), encerrada en piel dura, cubierta de arcilla o colocada con piedras calientes en bolsas de cuero llenas de agua (caldo de piedra). Los utensilios de cocina eran también rudimentarios, elaborados a base de piedra, hueso, cuernos, madera y cerámica.

Además del calentamiento y el cocinado, el fuego se usó para mejorar las propiedades de descamación de las piedras, para la quema controlada de vegetación que facilitó la caza y la regeneración del forraje, así como la movilidad humana y la recolección sincronizada de plantas (Smil, 2018). El fuego, como primera fuente de energía, se utilizó para

cocinar alimentos, calentar espacios, eliminar plagas, conservar alimentos mediante el ahumado y otros usos domésticos, como lo continúa haciendo una cuarta parte de la población mundial en la actualidad. En la Edad Media se usó la fuerza del agua y del aire para mover molinos, extraer agua y otras actividades mecánicas, además del uso del carbón para fundir metales y otras actividades productivas. También a finales de esa época se inventó la pólvora, que almacena una potente y explosiva energía química.

Posteriormente, en la Revolución Industrial se dio un cambio drástico en el uso de la energía. Primero con la invención de la máquina de vapor, y posteriormente con el uso del carbón mineral como combustible, se logró la mecanización de la producción, el transporte marítimo y ferroviario y en general el crecimiento de la industria. A finales del siglo XIX la invención del motor de combustión interna por Nikolaus August Otto incrementó exponencialmente el uso de los hidrocarburos. Más recientemente, la invención de la bombilla eléctrica por parte de Thomas Alva Edison y la generación y distribución de energía eléctrica por Nikola Tesla transformaron radicalmente a la sociedad.

La energía nuclear surge en la primera mitad del siglo XX, impulsada por Otto Hahn y Enrico Fermi. Su primer uso a gran escala fue como arma en Hiroshima y Nagasaki, y actualmente se utiliza como fuente de electricidad.

A mediados del siglo XX se presentan las crisis energéticas que obligan a la sociedad a buscar alternativas a los recursos fósiles; además, en el último tercio del siglo XX toman fuerza las preocupaciones ambientales, principalmente la contaminación que genera la producción de energía y que provoca el calentamiento global por el efecto invernadero y el cambio climático. Estos problemas ambientales han impulsado las fuentes renovables de energía como la solar, eólica, hidroeléctrica, geotermia, mareomotriz y biomasa.

En la actualidad se continúa investigando sobre tecnologías energéticas avanzadas, no solo enfocadas a la producción de energía, sino

también al almacenamiento de energía, en la captura y almacenamiento de carbono, la fusión nuclear controlada y la inteligencia artificial enfocada en la gestión sostenible de la energía. El uso de la energía es tan común en nuestros días que sería complicado imaginar un día de nuestra vida sin iluminación, sin alimentos cocinados, sin medios de transporte, de comunicación y entretenimiento, sin teléfono ni computadoras.

En resumen, podemos afirmar que el consumo de energía está directamente asociado al bienestar de las personas, es decir, la energía proporciona satisfactores que facilitan la vida, ayudan a producir, crear, inventar, convivir y disfrutar. En conjunto, las tareas energéticas proporcionan bienestar; caso contrario, la carencia de energía limita el desarrollo de las personas.

## **Consumo de energía**

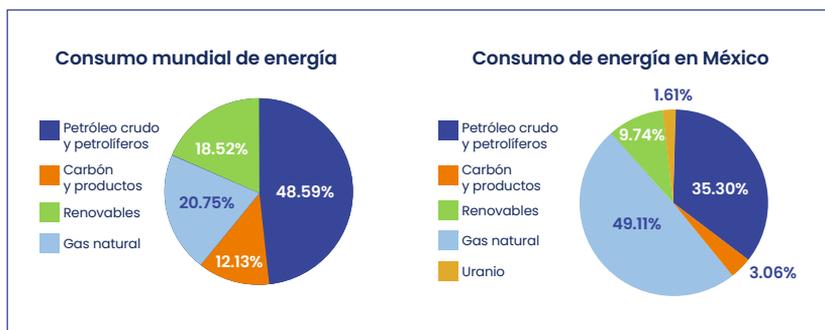
Para contextualizar el uso de la energía en la actualidad se muestra el consumo tanto en el ámbito mundial como nacional. Esta información se toma del Balance Nacional de Energía (BNE) que elabora la Secretaría de Energía (Sener) del Gobierno de México con información de diversas fuentes nacionales, y de la publicada por la Agencia Internacional de Energía (AIE, 2022).

### **Consumo mundial de energía**

En el año 2020 el consumo mundial de energía alcanzó los 400 819.44 PJ, menor en 4.1 % al año anterior. En la Figura 1 se muestra la participación de cada fuente, destacando el petróleo crudo y petrolíferos con 48.59 % del consumo mundial de energía, mientras que en México alcanzó 35.30 %. El gas natural representó el 20.75 % en el mundo y en México casi el doble con 49.11 %; la aportación del carbón y productos es de 12.13 % mundial y en México apenas de 3.06 %. Para el mundo no se reporta el consumo de uranio, por ser menor al 1 %, mientras que

en México aportó 1.61 %. Finalmente el consumo proveniente de renovables en el mundo alcanzó 18.52 % y en México 9.7 %, aproximadamente la mitad.

**FIGURA 1.** Consumo de energía (2020)



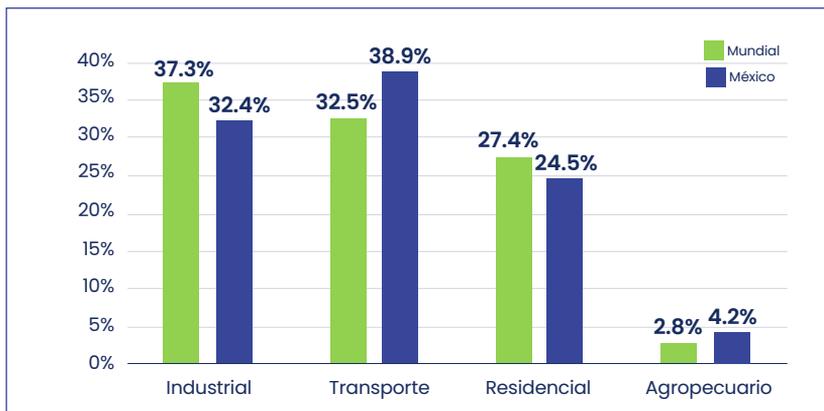
Fuente: Elaboración propia con datos obtenidos de Sener (2021).

En términos generales podemos afirmar que el sistema energético mundial es altamente dependiente de las energías fósiles, ya que alrededor del 80 % de la energía consumida proviene de estos recursos no renovables; en México se observa un patrón similar. Otra manera de visualizar la dimensión del uso mundial de energía es conocer el consumo por país. La AIE (2022) reporta que en el año 2020 solo cuatro países consumieron más del 50 % del total mundial: China (25.87 %), Estados Unidos de América (15.26 %), India (6.23 %) y Rusia (5.29 %). México se ubica en el decimotavo lugar con el 1.01 % del total mundial.

Este consumo también se puede asociar a los sectores donde se utiliza la energía: industrial, transporte, residencial, comercial y público, y agropecuario, como se muestra en la Figura 2. En el panorama mundial se observa que el principal consumidor de energía por sectores es la industria con 37.3 %, mientras que en México fue un poco menor, con 32.4 %; el sector transporte en el ámbito mundial representó 32.5 % y en México es el principal consumidor con 38.9 %. El tercer sector es el residencial, con 27.4 % del consumo mundial total y en el caso de México el porcen-

taje es de 24.5 % (incluido el comercial y público); finalmente, el sector agropecuario en el mundo apenas representa 2.8 % y en México 4.2 %. Lo importante a destacar es que el sector residencial es el tercer consumidor más importante, tanto en el ámbito mundial como en nuestro país.

**FIGURA 2.** Consumo de energía por sectores



Fuente: AIE (2022); Sener (2022).

### Consumo de energía en México

La energía que se consume en nuestro país es proporcionada por diversas fuentes, principalmente por combustibles fósiles y en menor medida por las renovables, como ya se comentó en la sección anterior. En México esta información se plasma en el Balance Nacional de Energía (BNE) que elabora la Secretaría de Energía (Sener), y que define como “un documento que muestra el desempeño y evolución del sector energético (en el año correspondiente) y permite realizar análisis comparativos de sus principales variables, con lo observado en años previos” (Sener, 2022). Asimismo, reporta las cifras del origen o destino de las fuentes primarias y secundarias de energía durante el año referido.

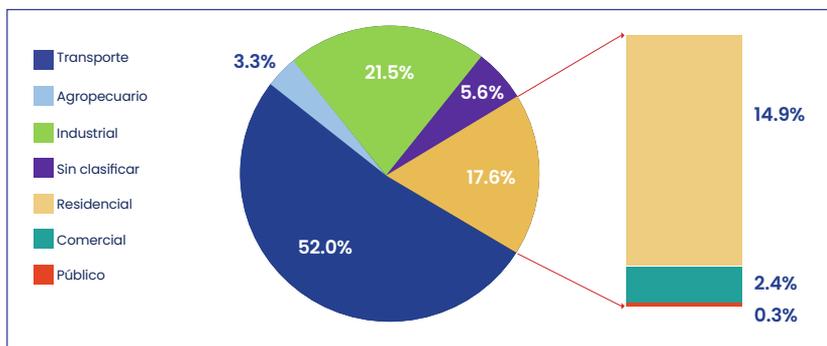
En este capítulo se presenta el consumo de energía por sectores, de acuerdo con la clasificación que realiza la Secretaría de Energía: indus-

trial, transporte, residencial, comercial y público, así como el agropecuario. La energía demandada por cada uno de estos sectores es cubierta por diferentes fuentes.

El consumo de energía por sectores reportado por el BNE (Sener, 2022) se muestra en la Figura 3, en la cual se observa que para el año 2021 el transporte demandó 52 %, siendo el mayor consumidor, y las principales fuentes de energía son la gasolina (67 %), diésel (26 %) y el resto es aportado por el queroseno, gas licuado de petróleo (GLP), electricidad, combustóleo y gas seco.

El sector industrial es el segundo consumidor con una demanda de 21.5 % del total de la energía consumida en México y los tres energéticos con mayor participación son: electricidad (33 %), gas seco (33 %) y coque de petróleo (11 %); con menor aportación le siguen el carbón, diésel, bagazo, GLP, combustóleo, gasolinas, naftas y solar.

**FIGURA 3.** Consumo de energía por sectores



Fuente: Sistema de Información Energética (Sener, 2022b).

El tercer lugar corresponde al sector residencial, comercial y público, en el cual se consume el 17.6 % del total nacional. Esta energía es aportada por el GLP, la leña, gas seco, solar y queroseno, donde el sector residencial consume 14.9 %, el comercial 2.4 % y el restante 0.3 % por el sector público. Es importante destacar que la energía eléctrica no está

distribuida en los sectores, sino que se presenta como consumo sin clasificar. En versiones anteriores del BNE la electricidad sí estaba incluida en cada sector.

Una característica que debe destacarse del BNE es que la información se presenta muy agregada, es decir, sin desglosar, por lo cual solo nos muestra una imagen general del sistema energético nacional en sus diversas variantes, por ejemplo, por energético o sector, pero no brinda el detalle del consumo de energía para cada uso final. No proporciona cuánta energía proveniente del GLP se destina al cocinado de alimentos y cuánta al calentamiento de agua para el aseo personal, tampoco reporta el tipo de dispositivos usados para el aprovechamiento de cada energético, ni su eficiencia.

Por lo cual, para analizar con mayor detalle al sector energético es necesario recurrir a otros enfoques. Desde las crisis energéticas del siglo pasado (1973 y 1979) se empezó a analizar el sector con la visión de los “usos finales”, es decir, a partir de las actividades o tareas que requieren energía. Esto ha permitido conocer con mayor detalle los consumos de energía para cada uso y sector, además de las tecnologías usadas, sus eficiencias y por supuesto las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) asociadas a su uso. En la siguiente sección se analizará con detalle el consumo de energía en el sector residencial.

### *Sector residencial*

Es importante iniciar esta sección señalando que la energía no es un fin en sí mismo, sino la vía para lograr la satisfacción de una necesidad. Es decir, necesitamos iluminación en las noches, entonces usamos la electricidad para conseguirlo; requerimos alimentos cocidos, entonces usamos GLP, leña, electricidad o energía solar; si requerimos trasladarnos usamos gasolina, diésel o electricidad en un medio de transporte, o energía humana para caminar o movernos en bicicleta.

En los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) de la ONU se especifica que el ODS 7 debe garantizar el acceso a una energía asequible, segura, sostenible y moderna para todos. Este objetivo tiene a su vez tres metas para el año 2030: 7.1. Garantizar el acceso a servicios energéticos asequibles, seguros y modernos; 7.2. Aumentar la proporción de energía renovable en el conjunto de fuentes energéticas; y 7.3. Duplicar la tasa de mejora de la eficiencia energética. Vale la pena recalcar que la energía y su utilización está vinculada directamente al cumplimiento de ocho de los 17 ODS de la ONU, aunque está relacionada con todos.

México, en su Informe Nacional Voluntario 2021 (Secretaría de Economía, 2021), reporta para la meta 7.1.1 el aumento en la cobertura de energía eléctrica, olvidando al resto de energéticos. Para la meta 7.2.1 una disminución de la participación de las energías renovables entre 2014 y 2016, pasando de 9.50 a 8.57 %; y para la meta 7.3.1 se reporta la intensidad energética medida en función de la energía primaria y el PIB, la cual muestra un incremento de casi 10 %. Conviene señalar que no son los indicadores más representativos, aunque son los que se reportan, pero lo más importante: no muestran avances claros en el cumplimiento de las metas de los ODS.

Otro tema primordial que está retomando fuerza, aunque se estudia desde los años ochenta del siglo pasado a raíz de la crisis petrolera de 1973, es el fenómeno conocido como “pobreza energética”, que se genera cuando una persona no satisface las necesidades humanas relacionadas con los usos de la energía, es decir, no ejerce sus derechos e implica una situación de pobreza. Estas necesidades humanas fundamentales son: a) iluminación; b) entretenimiento; c) calentamiento de agua; d) cocción de alimentos; e) refrigeración de alimentos; y f) confort térmico de la vivienda (García-Ochoa y Graizbord, 2016).

Como ya hemos mencionado, además de su importancia por ocupar el tercer lugar en el consumo energético nacional, la energía usada en este sector residencial está asociada directamente a la satisfacción de una necesidad de las personas en su vida cotidiana. Para entender me-

por al sector residencial, vale la pena retomar las definiciones de la Sener (2022) sobre el consumo en el sector residencial, comercial y público:

- a) Residencial. Es el consumo de combustible en los hogares urbanos y rurales del país. Su principal uso es la cocción de alimentos, calentamiento de agua, calefacción, iluminación, refrigeración y planchado.
- b) Comercial. Es el consumo de energía en locales comerciales, restaurantes y hoteles, entre otros.
- c) Público. Este sector incluye el consumo de energía en el alumbrado público, en el bombeo de agua potable y aguas residuales, así como en la tarifa temporal.

A pesar de que en el BNE se considera como un solo sector, en el Sistema de Información Energética (Sener, 2022b) sí se puede obtener datos para cada uno, como se muestra en la Tabla 1, sobre el consumo de cada sector y el tipo de fuente energética. De estos tres subsectores, el residencial es el que demanda la mayor cantidad de energía. Como ya hemos señalado, en este documento nos enfocaremos en el sector residencial, el cual representó el 70 % para los años 2018 y 2019 y el 85 % de la energía consumida en los años 2020 y 2021. El sector comercial demandó 14 % y el público apenas el 1 % para los años mencionados.

**TABLA 1.** Consumo de energía en los sectores residencial, comercial y público (PJ/año)

Sector, combustible / año	2018	2019	2020	2021
Total sector residencial, comercial y público	958.97	952.59	1 075.65	940.95
Energía solar	11.86	13.06	14.98	40.68
Leña	249.08	247.92	330.28	245.60
Gas licuado	309.74	292.93	365.74	300.28
Gas seco	42.38	40.90	35.45	39.49
Electricidad	345.91	357.77	329.20	314.78
<b>Residencial</b>	<b>760.60</b>	<b>748.94</b>	<b>914.88</b>	<b>796.59</b>

Energía solar	7.11	7.89	9.01	34.17
Leña	249.08	247.92	330.28	245.60
Gas licuado	246.45	231.04	289.54	239.10
Gas seco	30.16	29.94	25.95	27.66
Electricidad	227.80	232.15	260.10	250.06
<b>Comercial</b>	<b>167.44</b>	<b>170.70</b>	<b>145.41</b>	<b>130.31</b>
Energía solar	4.75	5.18	5.96	6.51
Gas licuado	63.29	61.89	76.20	61.17
Gas seco	12.22	10.96	9.50	11.83
Electricidad	87.17	92.68	53.75	50.80
<b>Público</b>	<b>30.93</b>	<b>32.95</b>	<b>15.36</b>	<b>14.05</b>
Energía solar	0.00	0.00	0.00	0.13
Electricidad	30.93	32.95	15.36	13.92

Fuente: Sener (2022b).

### *Principales características del sector residencial*

Como ya se menciona en la definición de la Sener, el sector residencial se divide en urbano y rural, cada uno con sus características propias. Desde la perspectiva del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI) se considera que una localidad es rural si su población es menor a los 2 500 habitantes, el resto son urbanas; sin embargo, no necesariamente es un indicador confiable ya que varios estudios sobre los patrones de consumo energético muestran que algunas ciudades de más de 10 000 habitantes siguen presentando un patrón de consumo energético eminentemente rural. Por ejemplo, cocinan con leña, elaboran pan con leña, fabrican utensilios de uso utilitario (ollas, platos, comales) con leña, su nivel de equipamiento es básico, no existe transporte urbano con alta demanda de energía, los comercios cierran para comer, el tráfico y la semaforización son incipientes.

En la Tabla 2 se muestran las necesidades energéticas de las personas en el sector residencial, las tecnologías usadas y las fuentes de donde proviene dicha energía.

**TABLA 2.** Necesidades energéticas y tecnologías usadas en el sector residencial de México

Necesidad energética (uso final)	Dispositivo	Energético
Cocción de alimentos	Estufa de GLP, de leña, eléctrica; horno de gas, eléctricos.	GLP, gas natural, leña, sol, electricidad.
Calentamiento de agua	Calentador de GLP, de gas natural, solar, eléctrico, leña.	GLP, gas natural, sol, leña electricidad.
Bombeo de agua	Bombas eléctricas, solares, de viento, gasolina, diésel, manuales.	Electricidad, sol, viento, gasolina, diésel, trabajo humano.
Iluminación	Focos, lámparas, velas, veladoras, ocote, candiles.	Electricidad, leña, petróleo.
Lavado de ropa	Lavadora eléctrica, de pedales.	Electricidad, trabajo humano.
Refrigeración	Refrigerador.	Electricidad, sol.
Entretenimiento	Televisión, computadora, radio, estéreo, teléfono, tabletas.	Electricidad, sol.

Fuente: Adaptado de Martínez y García (2022).

Para conocer los usos finales del sector residencial y profundizar su análisis, el INEGI, en colaboración con la Sener y la Comisión Nacional para el Uso Eficiente de la Energía (Conuee), aplicaron la Encuesta Nacional sobre Consumo de Energéticos en Viviendas Particulares (Encevi) en el año 2018. Los objetivos fueron: a) caracterizar los principales usos finales de la energía en las viviendas del país, por regiones; b) caracterizar el acceso a las fuentes de energía; c) conocer el equipamiento; d) horarios de uso; y e) criterios para elegir equipos y medidas de ahorro. Esta muestra fue representativa del país y de sus regiones climáticas: a) región climática extrema (norte); b) región templada (centro); y c) región tropical (sur), así como del sector rural y urbano. Los principales resultados son:

- 1) El 99 % de las viviendas habitadas cuentan con electricidad, en su mayoría de la red eléctrica y algunas con tecnología solar o una combinación de ambas.

- 2) Respecto al uso de combustibles para energía térmica, en el país el 79 % es proporcionado por el GLP, seguido de la leña o carbón vegetal con 11 % y el gas natural con 7 %.
- 3) Es importante destacar que en el norte y centro del país el principal combustible es el GLP con 77.3 % y 85.2 %, mientras que en el sur su aporte es de 64.8 % con una amplia participación de la leña, que alcanza 32 %.
- 4) El resto de los hallazgos se refiere al equipamiento de las viviendas:
  - a. Para iluminación, las tecnologías más utilizadas son: lámparas ahorradoras fluorescentes (76 %), incandescentes (16 %) y ahorradores LED (Light Emitting Diode, diodo emisor de luz) (12 %).
  - b. El 85 % de las viviendas usan una estufa para calentar o cocinar sus alimentos, las cuales pueden tener diversas capacidades y características.
  - c. Al menos 28.9 millones de viviendas particulares usan refrigeradores.
  - d. El 71 % de las viviendas utilizan lavadora, 75 % en el área urbana y 57 % en el área rural.
  - e. En el 62 % de las viviendas se usa plancha, 60 % posee una plancha de vapor.
  - f. Respecto a los televisores, 91.5 % de las viviendas poseen un equipo, ya sea LCD (Liquid Crystal Display, pantalla de cristal líquido), plasma, LED, analógica u OLED (Organic Light Emitting Diode).
  - g. Existen ventiladores en 45 % de las viviendas urbanas y en 41 % de las rurales. Poseer un ventilador es lo más común en

- 60 % de los casos, aunque existen viviendas que cuentan con más de cuatro unidades.
- h. El aire acondicionado tiene poca penetración, ya que solo 7 millones de viviendas poseen estos equipos, observándose la mayor concentración en la región norte.
  - i. La calefacción de interiores es una práctica que ocurre en la región norte, aunque con un porcentaje relativamente bajo de solo 20.4 % y se usa principalmente equipo eléctrico en el 46 % de los casos y el gas en 29 %.
  - j. Otra medida de confort es el aislamiento térmico, el cual tiene aún poco uso. En la región norte solo 15 % de las viviendas poseen algún tipo de aislamiento, principalmente del techo; en el centro y sur solo 1.5 % de los techos están aislados.
  - k. El calentador de agua está presente en 43.5 % de las viviendas, con diferente proporción en las regiones: norte (48 %), centro (56 %) y sur (9 %). En todas las regiones predominan los calentadores de gas (83 %, 77 % y 81 %), solar (2 %, 20 % y 6 %); eléctrico (9 %, 3 % y 12 %) y de leña (6 %, 3 % y 1 %).
- 5) Otra variable reportada es la penetración de los dispositivos eficientes como refrigeradores (72 %), lavadoras (65 %), aires acondicionados (53 %), calentadores (53 %) y estufas (43 %).
- 6) Finalmente, la Encevi informa sobre algunas prácticas de ahorro de energía en las viviendas, las más importantes son:
- a. Apagar los focos cuando no se necesitan: 98.7 %
  - b. Desconectar cargador de celular cuando no se usa: 92.8 %
  - c. Desconectar el horno de microondas: 65.3 %
  - d. Desconectar la televisión: 51.7 %

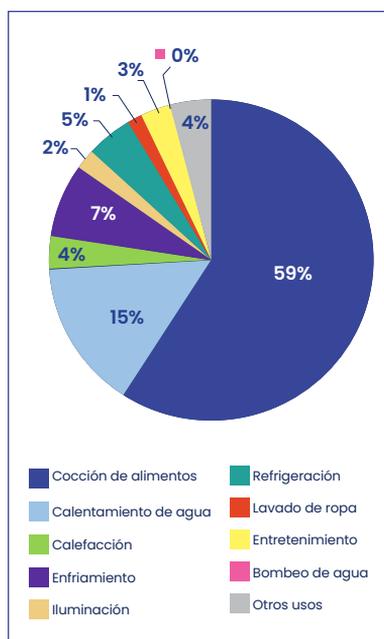
Como se ha observado, la información proporcionada por la Encevi nos permite conocer las características y el comportamiento de los usuarios de energía en el sector residencial, como el tipo de tecnología utilizada para cada una de las tareas energéticas, el tiempo de uso y algunas prácticas de ahorro, además de que confirma que el consumo de energía depende de las condiciones climáticas, económicas, sociales y culturales, así como de la disponibilidad del energético. Esto a pesar de que los resultados están muy agregados, ya que solo se divide al país en tres regiones: norte, centro y sur.

### *Implicaciones del consumo de energía en el sector residencial*

Como se observa, en la Encevi no se hace ningún cálculo del consumo de energía para cada uno de estos dispositivos, sino que se enfoca en identificar la cantidad y calidad de los equipos para cada tarea energética en el sector residencial.

A partir de estos datos, recolectados en el 2018 y publicados ese mismo año, recientemente se publicaron los resultados generados por Contreras et al. (2022), quienes realizaron un nuevo procesamiento de la encuesta para obtener información más precisa del consumo de energía en las viviendas de México en cada una de las regiones definidas por la Encevi. Su mayor aportación es la determinación del consumo de energía del sector residencial por tipo de energético y para lograrlo se asignaron consumos para

**FIGURA 4.** Usos finales de la energía en el sector residencial



Fuente: Tomado de Contreras et al. (2022).

las tareas o equipos utilizando valores reportados en estudios realizados en nuestro país. Los resultados más importantes se muestran en la Figura 4. La energía térmica es la principal forma de energía usada en el sector residencial, con 78 % del total. Se usa en tres tareas: cocción de alimentos (59 %), calentamiento de agua (15 %) y la calefacción de interiores (4 %); el restante 22 % es proporcionado por la electricidad para las otras tareas energéticas en las viviendas.

En términos energéticos, el consumo total del sector residencial en el año 2018 fue de 792.2 PJ, de los cuales 561 PJ corresponden al área urbana y 232.2 PJ al ámbito rural, es decir, 70.8 % de la energía residencial es consumida en el ámbito urbano y 29.2 % en el área rural (Tabla 3).

**TABLA 3.** Consumo de energía en el sector residencial (PJ/año)

Energético	Uso final	Nacional	Urbano	Rural
Leña	Cocción (incluye carbón vegetal)	277.0	109.0	169.0
	Calentamiento de agua	3.2	1.0	2.2
	Calefacción	4.0	3.0	0.0
	<b>Total</b>	<b>284.2</b>	<b>113.0</b>	<b>171.2</b>
Gas LP	Cocción	175.0	149.0	27.0
	Calentamiento de agua	88.0	85.0	3.0
	Calefacción	17.0	16.0	1.0
	<b>Total</b>	<b>280.0</b>	<b>250.0</b>	<b>31.0</b>
Gas natural	Cocción	7.0	7.0	0.0
	Calentamiento de agua	15.0	15.0	0.0
	Calefacción	3.0	3.0	0.0
	<b>Total</b>	<b>25.0</b>	<b>25.0</b>	<b>0.0</b>
Solar térmico	Calentamiento de agua	10.0	7.0	3.0
	<b>Total</b>	<b>10.0</b>	<b>7.0</b>	<b>3.0</b>
Electricidad	Cocción	9.0	8.0	1.0
	Iluminación	16.0	13.0	3.0
	Refrigeración	38.0	31.0	7.0
	Lavado de ropa	11.0	9.0	2.0
	Entretenimiento	24.0	20.0	4.0
	Enfriamiento	58.0	52.0	6.0
	Calefacción	3.0	3.0	0.0
	Calentamiento de agua	3.0	3.0	0.0
	Bombeo de agua	1.0	1.0	0.0
	Otros usos	30.0	26.0	4.0
	<b>Total</b>	<b>193.0</b>	<b>166.0</b>	<b>27.0</b>
<b>TOTAL</b>		<b>792.2</b>	<b>561.0</b>	<b>232.2</b>

Fuente: Tomado de Contreras et al. (2022).

### *Consumo de energía térmica*

Como se observa en la Figura 4, los principales usos finales son: cocción de alimentos (59 %), calentamiento de agua (15 %) y calefacción (4 %), es decir, el sector residencial demanda un 78 % de energía térmica. De acuerdo con la Tabla 3, los datos para el año 2018 reportan que para la cocción de alimentos se utilizan 277 PJ de leña, 175 PJ de GLP, 7 PJ de gas natural y 9 PJ de electricidad, esto es, 468 PJ al año, que corresponde al 59 % reportado anteriormente (Contreras et al. 2022).

La segunda tarea con mayor consumo de energía térmica es el calentamiento de agua, con 15 % del consumo energético residencial en el país, que es suministrada por la leña con 3.2 PJ, 88 PJ de GLP, 15 PJ de gas natural, 10 PJ de solar térmica y 3 PJ de electricidad. Aunque es un rubro importante, debido a las condiciones climáticas o económicas, 57 % de las viviendas no usan ningún tipo de calentador. La energía térmica es suministrada por calentadores de GLP, gas natural, calentadores solares de agua y una combinación de solar con GLP y solar con gas natural (INEGI, 2018; Contreras et al. 2022).

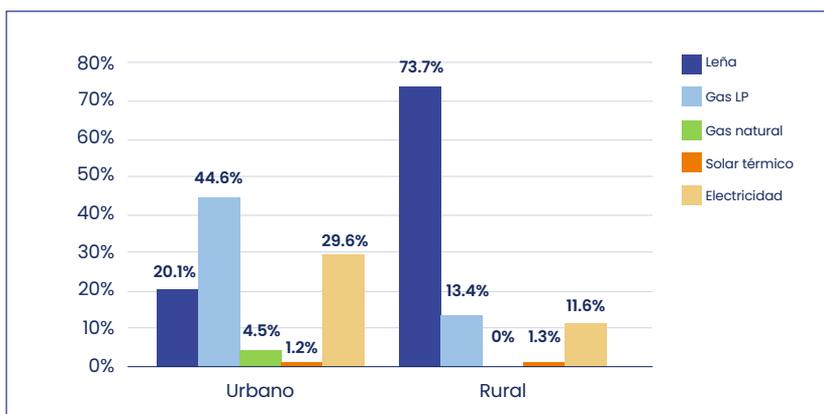
### *Consumo de energía eléctrica*

En el caso de la energía eléctrica, su consumo alcanza 22 % del sector residencial, es producida por diversas fuentes y se utiliza principalmente para: a) enfriamiento de espacios (7 %); b) refrigeración (5 %); c) iluminación (2 %); d) otros usos (4 %); e) entretenimiento (3 %) y el resto con 1 % o menos corresponde a f) lavado de ropa y g) bombeo de agua (Figura 4).

Ahora bien, el patrón de consumo energético es diferente para el ámbito urbano y el rural. En la Figura 5 se muestran las fuentes de energía utilizadas y, como ya se comentó, la principal demanda es de energía térmica, aunque con una composición distinta. Por ejemplo, en el área rural las principales fuentes son leña (74 %) y gas LP (13 %), mientras que en área urbana se observa una mayor contribución del gas LP (45 %), leña

(20 %) y gas natural (4.5 %). La participación de la energía solar térmica es mínima en ambos subsectores. La electricidad en el área rural alcanza 11.6 %, mientras que el área urbana es de 29.6 %.

**FIGURA 5.** Porcentaje de usos finales de energía: rural y urbano



Fuente: Tomado de Contreras et al. (2022).

Como ya se mencionó, la Encevi se realizó en el 2018, por lo tanto, toda la información generada se refiere a ese año. En la Tabla 4 se muestran las diferencias entre los datos oficiales reportados por la Sener y los resultados obtenidos por Contreras et al. (2022) mediante el re-procesamiento de la información de la Encevi.

**TABLA 4.** Consumo de energía residencial en el año 2018 (Sener y Encevi) (PJ/año)

Energético	Encevi	Sener	Diferencia	%
Leña	284.2	249.1	-35.1	-14.1 %
Gas LP	280.0	246.5	-33.5	-13.6 %
Gas natural	25.0	30.2	5.2	17.1 %
Solar térmico	10.0	7.1	-2.9	-40.7 %
Electricidad	193.0	227.8	34.8	15.3 %
<b>TOTAL</b>	<b>792.2</b>	<b>760.7</b>	<b>-31.5</b>	<b>-4.2 %</b>

Fuente: Elaborado con datos de Sener (2019) y Contreras et al. (2022).

En la primera columna se presentan los valores calculados a partir de la Encevi para el año 2018 por Contreras et al. (2022) y en la segunda los datos de la Sener, con la intención de determinar si los cálculos oficiales están sobreestimados o subestimados. Se asume que la información obtenida por Contreras et al. (2022) es más precisa debido a que emplean

la metodología de usos finales y asignan consumos específicos de combustible para cada tarea energética.

Ahora bien, revisando el consumo total para el año 2018, llama la atención la diferencia entre el consumo reportado por Contreras et al. (2022) y la Sener, de 31.5 PJ al año o del 4.2 % en términos porcentuales. Esta última cifra, desde la óptica de las proporciones, aparentemente es no significativa, pero en términos energéticos, los 31.5 PJ representan el doble del consumo de gas natural para calentamiento de agua (15 PJ/año) y tres veces más del uso de la energía solar térmica (10 PJ/año), como se puede verificar en la Tabla 3.

Pasando a las diferencias por fuente de energía, la mayor contradicción se presenta en el consumo de energía solar térmica que muestra una subestimación de la Sener equivalente al 40.7 % del valor reportado, o en términos energéticos a 2.9 PJ/año. Le siguen la leña (35.1 PJ) con un valor porcentual del 14.1 % y el gas LP (33.5 PJ) con 13.6 %; la subestimación de estos tres energéticos suma 71.5 PJ/año, lo cual representa una diferencia de 9.4 % entre los valores calculados por Contreras et al. (2022) y los reportados por la Sener (2019), que están subestimados.

Por otra parte, existe una sobreestimación de la Sener en el caso del gas natural y la electricidad: para el primero se reporta un consumo mayor en 5.2 PJ/año y para la electricidad es de 34.8 PJ/año; esto representa una diferencia de 17.1 % para el gas natural y de 15.3 % para la electricidad, lo cual significa una sobreestimación del 5.3 % respecto al consumo total del sector residencial.

Aunque estas diferencias son difíciles de explicar, puesto que el consumo energético del BNE no se determina a partir de los usos finales de la energía, lo importante es señalarlas para que la Sener adopte la metodología de usos finales para calcular el consumo en el sector residencial y pueda promover políticas energéticas que ayuden a utilizar equipos eficientes para reducir el consumo de energía y disminuir las emisiones de

gases de efecto invernadero, pero sobre todo, para lograr que el servicio energético mejore la calidad de vida de las personas.

Otras inconsistencias encontradas en la información de la Sener se muestran en la Tabla 5, donde se presenta la evolución del consumo de energía por fuente para los años 2018 hasta el 2021, así como la variación de cada fuente respecto al año anterior. Por ejemplo, en el caso de la leña, entre los años 2018 y 2019 se registró una ligera disminución del consumo (0.5 %), sin embargo, en el 2020 el crecimiento de esta fuente superó el 33 % respecto al 2019, para posteriormente caer 26 % en el 2021.

Sabemos que el consumo del combustible es en función de la cantidad de usuarios, de la eficiencia de la tecnología, del tipo y cantidad de alimento a cocinar, de la disponibilidad del combustible y otros factores, pero la variable principal es la cantidad de usuarios y el consumo per cápita, por lo cual estas variaciones son extrañas, ya que no hubo un cambio drástico de los usuarios ni mucho menos un cambio tecnológico brusco, aunque sí hubo un incremento del precio del GLP de alrededor de 25 % entre los años 2019 y 2020.

En el caso del consumo de leña, el incremento de 33 % puede obedecer a dos causas: la primera es el aumento de 25 % del precio del GLP, es decir, las familias que usan leña y GLP dejaron de utilizar este último combustible y volvieron exclusivamente a la leña. La segunda causa, y que también la considera la Sener, sería el mayor consumo de alimentos en la vivienda debido al confinamiento durante la pandemia de COVID-19, por lo cual se usaría más energía para cocinar alimentos, tanto leña como GLP, aunque no gas natural. Sin embargo, esta tendencia creciente en el consumo de energía térmica no se observa en el caso de la electricidad, ya que su variación representa 57 % respecto al GLP y 43 % en relación con la leña en el año 2020 y mostró una reducción de 4 % en el consumo del 2021.

Por otra parte, el consumo de gas natural disminuyó 13 % en el año 2020, aunque su precio se redujo 15 % y aumentó 6 % para el 2021. En

el caso de la energía solar térmica, su participación creció en el orden del 10 % entre 2019 y 2021 y experimentó un crecimiento exponencial en el año 2021, del orden del 279 %.

Como se observa en la Tabla 5, el patrón de consumo de energía en el sector residencial no tiene un comportamiento que permita afirmar que obedece a una sola causa, así como tampoco se puede inferir si esta tendencia se debió al confinamiento y a la variación en el precio de los energéticos.

**TABLA 5.** Evolución del consumo de energía residencial (PJ/año y en %)

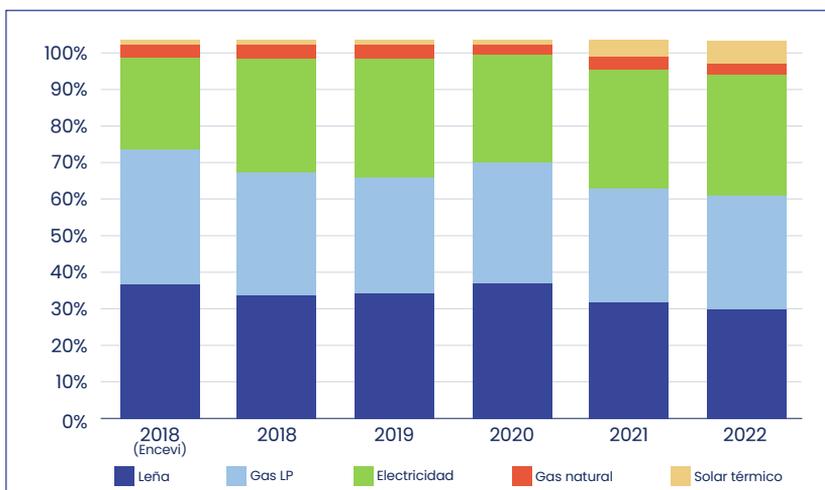
Energético	Consumo (PJ/año)/%				Evolución anual (%)		
	2018	2019	2020	2021	2018 -2019	2019 -2020	2020 -2021
Leña	249.1/32.75	247.9/ 33.11	330.3/36.11	245.6/30.83	-0.5 %	33.2 %	-25.6 %
Gas LP	246.5/32.40	231.0/30.85	289.5/31.65	239.1/30.01	-6.3 %	25.3 %	-17.4 %
Electricidad	227.8/ 29.95	232.1/31.00	260.1/28.43	250.1/31.39	1.9 %	12.0 %	-3.9 %
Gas natural	30.2/3.97	29.9/3.99	25.9/2.83	27.7/3.48	-0.7 %	-13.3 %	6.6 %
Solar térmico	7.1/0.93	7.9/1.06	9.0/0.98	34.2/4.29	10.9 %	14.3 %	279.1 %
<b>TOTAL</b>	<b>760.7/100.00</b>	<b>748.8/100.00</b>	<b>914.8/100.00</b>	<b>796.7/100.00</b>	<b>-1.5 %</b>	<b>22.2 %</b>	<b>-12.9 %</b>

Fuente: Sener (2022b).

En la Figura 6 se observa con mayor claridad la variación de la participación de las fuentes de energía por cada uso final (con base en los porcentajes que se muestran en la Tabla 5), destacando, como ya se ha mencionado, que existen diferencias significativas entre los consumos estimados a partir de la información de la Encevi (Contreras et al., 2022) y la reportada por la Sener.

Durante las últimas décadas se han realizado varios estudios que efectivamente reportan que la Sener ha subestimado el consumo de energía en los BNE, particularmente el consumo de leña, como los de Masera et al. (1993), Sheinbaum (1996), Díaz (2000) y Serrano-Medrano et al. (2014). La mayoría de estos estudios han recomendado la inclusión de la metodología de usos finales para determinar el consumo de energía en el BNE para el sector residencial.

**FIGURA 6.** Evolución del consumo de energía residencial (porcentaje)



Fuente: Tomado de Contreras et al. (2022).

Hace algunos años, la Sener adoptó la metodología de usos finales para el caso de la leña y recalculó su consumo desde el año 2009 hasta la fecha, sin embargo, mantiene los consumos unitarios constantes, aunque ya existe mayor evidencia que puede refinar la metodología y generar mejores resultados.

Es indudable que la determinación del consumo de energía para cada una de las tareas energéticas a partir del consumo unitario de cada tecnología utilizada nos brinda información más precisa y consistente para poder realizar análisis de tendencias y por supuesto permite la planeación energética que garantice el suministro de energía en la cantidad y calidad requeridas para brindar mejores servicios energéticos a la población y reducir las emisiones de gases de efecto invernadero.

### *Energía y ambiente*

Sin duda, existe un fuerte vínculo entre la energía y el desarrollo de la humanidad. También es innegable que la producción y uso de la

energía causa impactos en nuestro medioambiente, que se presentan desde la exploración para encontrar nuevos yacimientos de carbón, nuevos pozos de petróleo, ubicar y preparar terrenos para instalar plantas solares fotovoltaicas, pasando por la extracción, procesamiento, transportación, almacenamiento y distribución, hasta el consumo final de la energía.

Aunque cada vez somos más conscientes como sociedad del impacto que todas nuestras actividades causan al ecosistema, aún nos resistimos a modificar nuestros patrones de consumo y sobre todo a cambiar nuestro estilo de vida, que es finalmente la principal causa de los daños al ambiente.

Posiblemente una de las causas de la poca o nula conciencia del daño que como consumidores ocasionamos al ambiente al usar energía es que normalmente no vemos ningún impacto ambiental cuando encendemos las luces de nuestra vivienda o conectamos nuestra computadora, celular o vemos la televisión. No somos conscientes de que estamos ocasionando un daño en algún lugar del planeta, ya sea por la producción, transformación y conducción de la electricidad o por la fabricación de los dispositivos que utilizamos y que evidentemente usaron energía en su elaboración.

Es un poco distinto el caso del cocinado de alimentos, ya que los usuarios de leña sí sufren los impactos de su uso, aunque también en muchos casos la contaminación generada por utilizar tecnologías ineficientes se ha normalizado y ya no se percibe como problema.

## **Energía y cambio climático**

---

En la actualidad hemos pasado del cambio climático a la crisis climática, es decir, ya estamos viviendo y padeciendo las consecuencias del cambio climático. Ya no existe duda de que el cambio climático tiene causas antropogénicas, esto es, ocasionado por las actividades de la humanidad, tal como lo ratifica el 97 % de expertos en una encuesta realizada por

Myers et al. (2021) a profesionistas de las geociencias en instituciones académicas y de investigación. De igual forma, Lynas et al. (2021) reportan que en una revisión exhaustiva de artículos científicos publicados desde el año 2012 existe un consenso superior al 99 %. En el mismo sentido, la comunidad científica está de acuerdo en que las emisiones de gases de efecto invernadero son la principal causa del cambio climático, y que son producidas en su mayoría por el sector energético a lo largo de cada eslabón de la cadena de valor de la energía.

De acuerdo con el Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC, 2021), el cambio climático causado por las actividades humanas ya influye en muchos fenómenos meteorológicos y climáticos extremos en todas las regiones del mundo: olas de calor, precipitaciones intensas, sequías y ciclones tropicales. En términos coloquiales, las personas comentan que hace frío en primavera, calor en invierno y llueve en época de secas.

Se estima que las actividades humanas han causado un calentamiento global de aproximadamente 1.0 °C respecto a las actividades preindustriales, con rangos ente 0.8 y 1.2 °C. También se considera que, de continuar las emisiones al ritmo actual, se alcanzará un calentamiento global de 1.5 °C entre los años 2030 y 2052 (IPCC, 2021).

Entre los gases antropogénicos de efecto invernadero el más importante es el CO<sub>2</sub>, que representa 74 % de las emisiones totales y que proviene del sector energía (93 %). El metano (CH<sub>4</sub>) aporta 17 % y el óxido nitroso 6 %, los cuales provienen de la agricultura, tratamiento de residuos y la quema de gas. Los gases fluorados de los procesos industriales representan 2 % de las emisiones totales.

El consumo de energía es el principal generador de emisiones antropogénicas de GEI. Es responsable de 76 % de las misiones globales e incluye al transporte, generación de electricidad y calor, edificaciones, industria (manufactura y construcción), emisiones fugitivas y quema de otros combustibles. Le siguen la agricultura que incluye a la ganadería, con 12 %; la industria química, cementera y otras con 5.9 %; los residuos

sólidos y líquidos con 3.3 % y finalmente el uso de suelo, cambio de uso y la deforestación con 2.8 %.

Los principales países emisores de GEI son los mayores consumidores de energía, como ya se mostró en las secciones anteriores. La información disponible para el año 2018 reporta que China emite alrededor de 30 % de las emisiones globales y Estados Unidos 14 %; le siguen la India, Rusia y Japón. México ocupa el lugar número 12, con una aportación de 1.4 % de las emisiones globales.

De acuerdo con el informe 2022 de *Lancet Countdown* (Romanello et al., 2022), la dependencia de los combustibles fósiles, además de estar deteriorando la salud mundial, afecta directamente la salud y el bienestar de las personas por la volatilidad del mercado energético, la fragilidad de las cadenas de suministro y los conflictos geopolíticos. Como consecuencia, millones de personas no tienen acceso a la energía para cubrir necesidades básicas de iluminación, conservación de alimentos y medicinas, o brindar temperaturas confortables en las viviendas.

México, al igual que 193 países del mundo, forma parte de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC) desde el año 1994. Todos los países miembros están comprometidos a elaborar y actualizar su inventario nacional de emisiones de gases de efecto invernadero, para asumir compromisos de reducciones anuales.

El Inventario Nacional de Emisiones de Gases y Compuestos de Efecto Invernadero (INEGYCEI) se actualizó para el año 2015 y reporta emisiones de 683 MtonCO<sub>2</sub>e, siendo el transporte el mayor contribuyente con 23.4 %; le sigue la generación de energía eléctrica con 18.3 %, la ganadería con 10.3 % y los residuos con 6.7 % (Semarnat, 2018).

Por su parte, el carbono negro (hollín) emitió 112 kton, derivadas del sector autotransporte, ingenios azucareros con 26.8 % y el uso de leña en las viviendas con 26.3 % (Semarnat, 2018).

En la Sexta Comunicación Nacional y Segundo Informe Bienal de Actualización, México asumió el compromiso voluntario de reducir 22 % de las emisiones de GEI para el año 2030 respecto a la línea base y 51 % de carbono negro (Semarnat, 2018).

### **Oportunidades de mitigación en el sector residencial**

Como ya se documentó, el sector residencial demanda principalmente energía térmica y electricidad, por lo cual la disminución de las emisiones de GEI implica necesariamente la reducción del consumo o el uso más eficiente de ambos tipos de energía.

En nuestro país los programas de eficiencia energética surgieron en la Comisión Federal de Electricidad (CFE) a principios de los años ochenta, con el Programa Nacional de Uso Racional de Energía Eléctrica, y por parte de Petróleos Mexicanos (Pemex) con el Programa de Conservación y Ahorro de Energía. A finales de esa misma década, en 1989, se crea la Comisión Nacional para el Ahorro de Energía (Conae).

En la década de los noventa surgió el Fideicomiso para el Ahorro de Energía Eléctrica (Fide), enfocado en la promoción del ahorro y el uso eficiente de la energía en la industria, el comercio y los servicios, de las micro, pequeñas y medianas empresas, además de los municipios, sector residencial y agrícola.

Ya en el siglo actual, en el año 2008 se publica la Ley para el Aprovechamiento Sustentable de la Energía y la Conae es sustituida por la Comisión Nacional para el Uso Eficiente de la Energía (Conuee), que se encarga de promover la eficiencia energética y posee autonomía técnica y operativa. Más recientemente, en 2015 se publicó en el Diario Oficial de la Federación la Ley de Transición Energética.

También han existido otras leyes y programas como la Ley para el Aprovechamiento de Energías Renovables y el Financiamiento de la Transición Energética, que crea el Fondo para la Transición Energética y

el Aprovechamiento Sustentable de la Energía para potenciar el financiamiento de la transición energética, el ahorro de energía, las tecnologías limpias y el aprovechamiento de las energías renovables.

Existen otras iniciativas como la Hipoteca Verde, impulsada por la Comisión Nacional de Vivienda para equipar a las casas nuevas con tecnología eficiente tanto para el uso de electricidad como de gas LP, y los programas Ecocasa de la Sociedad Hipotecaria Federal.

Con la publicación de la Ley Federal sobre Metrología y Normalización en 1992, las dependencias de gobierno constituyeron comités consultivos nacionales para crear las Normas Oficiales Mexicanas (NOM), por lo cual la Sener y la Conae integraron el Comité Consultivo Nacional de Normalización para la Preservación y Uso Racional de los Recursos Energéticos para iniciar el Programa de Normalización de Eficiencia Energética, que permitió que en 1994 se publicaran las primeras NOM-ENER que tuvieron vigencia a partir de 1995.

En el 2009 el Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático y la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales publicaron el Programa Especial de Cambio Climático a fin de impulsar medidas y acciones para la mitigación de gases de efecto invernadero y de adaptación al cambio climático. Posteriormente, en 2012 se publicó la Ley General de Cambio Climático (LGCC) con el objetivo de garantizar el derecho a un medioambiente sano y establecer las facultades y concurrencia de la federación, estados y municipios para la definición de las políticas públicas para la mitigación de emisiones de GEI y la adaptación al cambio climático.

En la reforma energética de 2013 se estableció el mandato para que la Conuee elaborara la Estrategia de Transición para Promover el Uso de Tecnologías y Combustibles más Limpios, la cual se publicó en el 2014 con recomendaciones para impulsar políticas públicas que facilitarían la transición energética y como consecuencia se promueve y publica la Ley de Transición Energética en el año 2015. Por lo tanto, la Estrategia de

Transición se actualiza en el 2016 estableciendo políticas y acciones de eficiencia energética, con metas de reducción de la intensidad energética<sup>1</sup> de consumo final a 1.9 % por año en el periodo de 2016 a 2030 y una reducción de 3.7 % para los años comprendidos entre 2031 y 2050. Es importante destacar que todas las medidas estaban alineadas para contribuir al cumplimiento de la LGCC.

En resumen, y después de esta revisión histórica del ahorro y uso eficiente de la energía en nuestro país, podemos decir que las instituciones que han impulsado estas políticas, programas y acciones se han enfocado en:

- a) La normalización de equipos, productos y sistemas energéticos con el propósito de garantizar su eficiencia energética.
- b) Programas de apoyo a los usuarios finales para la sustitución de equipos ineficientes por equipos más eficientes.
- c) Programas de información, sensibilización y educación a los usuarios para que adopten mejores prácticas en el uso de la energía.

De acuerdo con la Comisión Nacional para el Uso Eficiente de la Energía, entre 1995 y 2015 el sector residencial experimentó una notable reducción en el consumo de energía para varios servicios como la iluminación, confort, preparación y conservación de alimentos e higiene personal, lo cual obedece a la implementación de programas y acciones de eficiencia energética (Cepal, 2018).

Para la reducción del consumo de electricidad se debe incrementar el uso de tecnologías eficientes como lámparas, refrigeradores, calentadores, sistemas de enfriamiento (aire acondicionado), estufas eléctricas, de gas y de leña. Desde hace tres décadas se han promovido medidas de

<sup>1</sup> La intensidad energética mide la cantidad de energía que se requiere para obtener una unidad del producto interno bruto (PIB).

eficiencia energética desde la Conae y luego Conuee, el Fide y la CFE, enfocadas principalmente en la energía eléctrica.

Como ya se describió en la sección anterior, ha aumentado el uso de tecnologías eficientes en el sector residencial. En la Figura 7 se puede ver la penetración de las tecnologías eficientes en México. El 72 % de las familias que cuentan con refrigerador utilizan un equipo que posee la etiqueta de eficiencia energética, 65 % de los sistemas de lavado son eficientes, 56 % de los sistemas de aire acondicionado están certificados y 53 % de las familias con un calentador de gas usan equipos que cumplen con la normatividad. En el caso de las estufas de gas, solo 43 % de las familias que cocinan con estos equipos usan tecnologías eficientes.

De acuerdo con la Conuee, México ha experimentado una reducción en el consumo de leña y gas LP, pasando de 43.1 % en 1990 a 30.8 % en año 2021 para la leña y de 39.3 % a 30 % del GLP en el mismo periodo, mientras se observa un incremento en el consumo de electricidad, como se ilustra en la Tabla 6 y la Figura 8, pasando de 11.4 % a 31.4 % en el periodo de 1990 a 2021 debido a una mayor cobertura en las zonas urbanas y rurales, así como al aumento del equipamiento de las viviendas y por lo tanto el abandono de tecnologías para cocinar con leña, que se sustituyen con el uso de hornos de microondas (Cepal, 2018). Esta afirmación no es completamente cierta, ya que la sustitución de combustibles no ocurre de forma automática.

**TABLA 6.** Porcentaje del consumo de energía en el sector residencial (1990-2021)

Energético	Consumo (%)							
	1990	1995	2000	2005	2010	2015	2020	2021
Energía solar	0.1	0.1	0.1	0.2	0.4	0.7	1.0	4.3
Leña	43.1	39.5	39.0	36.4	33.9	33.5	36.1	30.8
Gas licuado	39.3	42.6	40.0	37.6	38.2	33.5	31.6	30.0
Querosenos	1.5	0.6	0.2	0.2	0.2	0.3	0.0	0.0
Gas seco	4.6	2.8	2.9	4.7	4.1	5.0	2.8	3.5
Electricidad	11.4	14.5	17.8	20.9	23.2	27.0	28.4	31.4

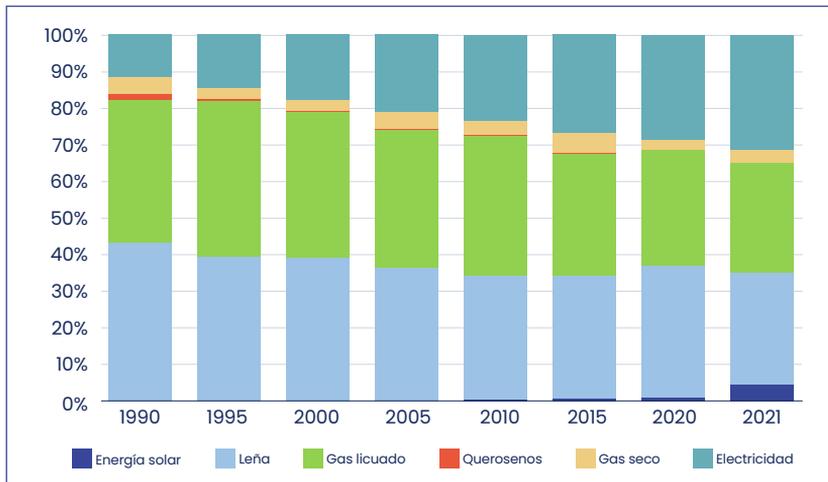
Fuente: Elaboración propia a partir de Sener (2022b).

**FIGURA 7.** Porcentaje de familias que reportan el uso de tecnologías eficientes



Fuente: INEGI (2018).

**FIGURA 8.** Evolución del consumo de energía en el sector residencial (1990-2021)



Fuente: Elaboración propia a partir de Sener (2022b).

Aunque la tendencia decreciente en el consumo de energía térmica a partir de la leña puede ser un indicador de movimiento en la escalera de la energía, es decir, ascender a combustibles y tecnologías más lim-

pías cuando se incrementa el poder adquisitivo, esto no necesariamente ocurre en México. Analizar la tarea energética utilizada para el cocinado de alimentos presenta la mayor complejidad de todas las necesidades del sector residencial.

Está suficientemente documentado (Berrueta et al., 2008; Serrano-Medrano et al., 2018) que las familias usan una estrategia de uso mixto (o combinado) de combustibles y tecnologías para cocinar sus alimentos, por lo cual la sustitución de combustibles y tecnologías no ocurre completamente. Por ejemplo, usan el fogón tradicional para cocinar grandes cantidades de alimentos (nixtamal, tamales, fiestas), la estufa eficiente para elaborar tortillas y calentar agua, la estufa de gas para calentar los alimentos y las tortillas, y el horno de microondas para calentar agua para los biberones, papillas o café.

En resumen, la eficiencia energética ha probado ser una muy buena opción para disminuir el consumo de energía y por lo tanto evitar las emisiones de GEI que aceleran el cambio climático. Pero como ya hemos señalado, las acciones en México se han enfocado en la electricidad olvidando la producción de energía térmica, que —como también hemos ilustrado— es la mayormente utilizada en el sector residencial. Sin embargo, a partir de experiencias locales, sobre todo para el cocinado de alimentos con leña, se han realizado estimaciones de las emisiones de gases de efecto invernadero y el potencial de mitigación (Tabla 7).

Como se puede observar en las diferentes estimaciones, el potencial de mitigación de GEI de la leña por el uso de tecnología eficiente va desde 14 % hasta 35 % o entre 3.2 y 7.9 MtCO<sub>2e</sub> al año, cifras que representan entre 2 % y 5 % del compromiso de reducciones asumido por México.

Es importante destacar que las variaciones para calcular las emisiones de GEI en el caso de la leña dependen de la renovabilidad del com-

**TABLA 7.** Estimaciones de emisiones de GEI y su potencial de mitigación

Emisiones MtCO <sub>2e</sub> /año	Potencial de mitigación MtCO <sub>2e</sub> /año	Comentarios
15.4	4.16 (27 %) 5.10 (33 %)	Solo se refiere a la leña (Serrano-Medrano, 2016).
22.77 14.9 16.1 19.6	Año base 7.9 (35 %) 6.7 (29 %) 3.2 (14 %)	Consumo de leña para año base y tres escenarios distintos (Serrano-Medrano et al., 2018).
20.18	No se reporta mitigación	Sector residencial INEGYCEI, INECC.
50-58 Electricidad 58 % GLP 37 % GN 3 % Leña (2 % y 19 %) Carbón vegetal (1 %)	No se reporta mitigación	Sector residencial (Contreras et al., 2022).

Fuente: Elaboración propia con información de los estudios referidos.

bustible<sup>2</sup> y para el caso del potencial de mitigación también es en función de la combinación de tecnologías y combustibles usados en la construcción de escenarios, por ejemplo estufas eficientes de leña o una combinación de estufa de leña y estufa de gas.

El potencial de ahorro de energía y reducción de emisiones justifica y exige con premura la implementación de acciones que mejoren la producción de energía térmica en el sector residencial. Algunas medidas que deben adoptarse son, de acuerdo con lo planteado por México en la Sexta Comunicación Nacional (Semarnat, 2018), son:

- a) Calentadores solares de agua.
- b) Sustitución de calentadores a gas de baja eficiencia por calentadores eficientes.

<sup>2</sup> Se considera que la leña es neutra en emisiones de CO<sub>2</sub> ya que absorbe la misma que cantidad que libera durante su descomposición o combustión. En las estimaciones se considera que un porcentaje de la leña es renovable y se cambia para los distintos escenarios.

c) Regaderas ahorradoras de agua.

d) Eficiencia energética en los hogares y comercios.

Varias de estas acciones han sido planteadas en diversos escenarios de consumo de energía, medidas de eficiencia energética y reducción de las emisiones; el realizado por Islas et al. (2015) se muestra en la Tabla 8.

A partir de consideraciones económicas, de eficiencia y disponibilidad tecnológica se creó un escenario para el periodo 2010 al 2035 que abarca a todo el sector energético de México, aunque en este caso se presentan las opciones exclusivas del sector residencial como el uso de lámparas eficientes, refrigeradores certificados, así como sistemas de aire acondicionado y aislamiento térmico para mantener el confort de las viviendas, además de calentadores solares de agua, estufas eficientes de leña para cocinar y sistemas fotovoltaicos interconectados para proveer de electricidad a las viviendas. La mitigación anual del sector residencial es de 11.6 MtCO<sub>2e</sub>, que representa 7.7 % del compromiso mexicano para el año 2030.

**TABLA 8.** Opciones de mitigación en el sector residencial (MtCO<sub>2e</sub>)

Opción de mitigación	2010 al 2035	Anual
Lámparas eficientes	87.6	3.5
Refrigeradores	65.9	2.6
AC y aislamiento térmico	48.5	1.9
Calentadores eficientes de gas	22.7	0.9
Calentadores solares	19.2	0.8
Estufas eficientes de leña	42.8	1.7
Sistemas FV interconectados	2.4	0.1
<b>Total</b>	<b>289.1</b>	<b>11.6</b>

Fuente: Adaptado de Islas et al. (2015).

Como se observa, el potencial de mitigación de las estufas eficientes de leña en la estimación de Islas et al. (2015) está subestimada en comparación con la de Serrano-Medrano et al. (2018).

## Conclusiones y recomendaciones

Es evidente que el sector residencial presenta complejidades particulares ya que involucra a toda la población del país y las tareas energéticas van desde el uso de simples lámparas en la vivienda y carga de equipo

eléctrico hasta la complejidad del cocinado de alimentos que obedece a cuestiones culturales, sociales, de gustos y por supuesto de accesibilidad de las tecnologías y combustibles. El hecho más importante es que, contrario a la creencia general de que se consume mucha energía eléctrica, la energía térmica es el principal uso que demanda el sector residencial y es proporcionada por la leña, el gas licuado de petróleo, el gas natural y por la solar térmica.

La promoción de la eficiencia energética mediante programas de ahorro y reducción del consumo de energía ha dado resultados, así como el impulso de las NOM de energía, por lo tanto, se debe continuar con la normalización de tecnologías de uso residencial. Particularmente es necesario avanzar con mayor velocidad en las tecnologías de energía térmica, por ejemplo, la NOM sobre estufas de leña, la cual está en proceso de elaboración por parte de la Conuee y Sener y que tomó como base la norma mexicana NMX-Q-001-NORMEX-2018 impulsada desde la sociedad civil por GIRA AC<sup>3</sup> y un grupo de instituciones como la Universidad Nacional Autónoma de México, el INECC y algunos fabricantes de estufas.

Como se ha señalado, el principal consumo de energía en el sector residencial es la térmica, por lo que las acciones deben centrarse en las tareas energéticas que la demandan, es decir, el cocinado de alimentos y el calentamiento de agua. Para reducir el consumo de leña en el cocinado de alimentos se han promovido las estufas eficientes de leña; desafortunadamente, una buena parte de las que están disponibles en México no cumplen con los requisitos mínimos de eficiencia, por lo tanto, urge la creación de la NOM y su aplicación para asegurar que las tecnologías sean eficientes para su posterior promoción mediante programas bien planeados, de mediano y largo plazo que incluyan la participación del usuario, ya que no se puede continuar regalando estufas y que no se utilicen. Asimismo, se deben promover tecnologías complementarias como las estufas u ollas solares, dispositivos eléctricos como hornos y ollas para calentar agua y de cocción lenta.

---

3 Grupo Interdisciplinario de Tecnología Rural Apropriada AC. [www.gira.org.mx](http://www.gira.org.mx)

En el caso del calentamiento de agua, es indispensable el cambio a calentadores más eficientes y en donde lo permitan las condiciones climáticas promover el uso de calentadores solares e incluso tecnologías eléctricas para esta tarea.

Por otra parte, para asegurar una correcta definición de políticas energéticas, programas y acciones, es indispensable que la Sener actualice su metodología para calcular el consumo de energía en el sector residencial, que es el tercer sector en el país solo detrás del transporte y la industria.

En general, las medidas de eficiencia y ahorro de energía en el sector residencial han funcionado, sin embargo, el sector energético debe estar preparado porque en el mediano plazo la región sur, que actualmente posee un nivel de equipamiento incipiente, va a mejorar sus condiciones económicas y como consecuencia las familias adquirirán más equipos y se incrementará la demanda de energía.

Aunque el consumo de energía de los vehículos particulares se reporta en el sector transporte, es indudable que está vinculado a las familias, por lo cual valdría la pena analizar su participación en el gasto familiar y por supuesto en la determinación de la huella ecológica de toda la energía usada por las familias, tanto en sus viviendas como en sus actividades productivas y recreativas fuera de su hogar.

## REFERENCIAS

- Agencia Internacional de Energía. (2022). *World Energy Balances*. AEI. <https://www.iea.org/data-and-statistics/data-product/world-energy-balances>
- Bar-Yosef, O. (2002). The Upper Paleolithic revolution. *Annual Review of Anthropology*, 31, 363-393. <https://doi.org/10.1146/annurev.anthro.31.040402.085416>
- Berrueta, V., Edwards, R. D., y Masera, O. R. (2008). Energy performance of wood-burning cookstoves in Michoacan, Mexico. *Renewable Energy*, 33, 859-870. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2007.04.016>
- Comisión Económica para América Latina y el Caribe. (2018). *Informe nacional de monitoreo de la eficiencia energética de México, 2018*. Cepal. <https://www.cepal.org/es/publicaciones/43612-informe-nacional-monitoreo-la-eficiencia-energetica-mexico-2018>
- Contreras, M., Masera, O., y Serrano, M. (2022). *Patrones de consumo energético en el sector residencial de México: un análisis desde la perspectiva de usos finales*. Conacyt, Planeas, Pronaces-ECC.
- Díaz, R. (2000). *Consumo de leña en el sector residencial de México: evolución histórica y emisiones de CO<sub>2</sub>* [Tesis de maestría]. División de Estudios de Posgrado, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México.
- García-Ochoa, R., y Graizbord, B. (2016). Caracterización espacial de la pobreza energética en México. Un análisis a escala subnacional. *Economía, Sociedad y Territorio*, 16(51), 289-337.
- Goren-Inbar, N., Alperson, N., Kislev, M. E., Simchoni, O., Melamed, Y., Ben-Nun, A., y Werker, E. (2004). Evidence of hominin control of fire at Gesher Benot Ya'aqov, Israel. *Science*, 304, 725-727. <https://www.science.org/doi/10.1126/science.1095443>
- Goudsblom, J. (1995). *Fire and Civilization*. Penguin Group.

- Instituto Nacional de Estadística y Geografía. (2018). *Encuesta Nacional sobre Consumo de Energéticos en Viviendas Particulares (Encevi)*. INEGI. <https://www.inegi.org.mx/programas/encevi/2018/>
- Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático. (2021). *Cambio climático 2021. Bases físicas*. IPCC. [https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/downloads/report/IPCC\\_AR6\\_WG1\\_SPM\\_Spanish.pdf](https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/downloads/report/IPCC_AR6_WG1_SPM_Spanish.pdf)
- Islas, S. J. M., Manzini, P. F., Macías, G. P., y Grande, G. K. A. (2015). *Hacia un sistema energético mexicano bajo en carbono. Desplegando el potencial de las energías renovables y del ahorro y uso eficiente de la energía*. Reflexio/Ediciones, Academia y Comunicación.
- Karkanias, P., Shahack-Gross, R., Ayalon, A., Bar-Matthews, M., Barkai, R., Frumkin, A., Gopher, A., y Stiner, M. (2007). Evidence for habitual use of fire at the end of the Lower Paleolithic: Site-formation processes at Qesem Cave, Israel. *Journal of Human Evolution*, 53(2), 197-212. <https://doi.org/10.1016/j.jhevol.2007.04.002>
- Lynas, M., Houlton, B. Z., y Perry, S. (2021). Greater than 99 % consensus on human caused climate change in the peer-reviewed scientific literature. *Environmental Research Letters*, 16(11), 114005. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ac2966>
- Martínez, R., y García, C. (2022). *Energía, Ambiente y Sociedad. Libro de apoyo a la docencia*. Escuela Nacional de Educación Superior, UNAM.
- Masera, O., Friedmann, R., y de Buen, O. (1993). *Residential energy use in Mexico: Structure, evolution, environmental impacts, and savings potential*. Energy Analysis Program. <https://doi.org/10.2172/10176360>
- Myers, K. F., Doran, P. T., Cook, J., Kotcher, J. E., y Myers, T. A. (2021). Consensus revisited: Quantifying scientific agreement on climate change and climate expertise among Earth scientists 10 years. *Environmental Research Letters*, 16(10), 104030. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ac2774>
- Romanello, M., Di Napoli, C., Drummond, P., Green, C., Kennard, H., Lampard, P., Scamman, D., Arnell, N., Ayeb-Karlsson, S., Ford, L. B., Belesova, K., Bowen, K., Cai, W., Callaghan, M., Campbell-Lendrum, D., Chambers, J., van Daalen, K. R., Dalin, C., Dasandi, N., ... y Costello, A. (2022). The 2022 report of the Lancet

Countdown on health and climate change: Health at the mercy of fossil fuels. *Lancet*, 400, 10363. [https://doi.org/10.1016/S0140-6736\(22\)01540-9](https://doi.org/10.1016/S0140-6736(22)01540-9)

Serrano-Medrano, M. (2016). *Escenarios espaciales explícitos de uso múltiple de combustibles para cocción en el sector energético residencia mexicana y su potencial de mitigación de gases de efecto invernadero* [Tesis de doctorado]. Programa de Maestría y Doctorado en Ingeniería, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México.

Serrano-Medrano, M., Arias-Chalico, T., Ghilardi, A., y Masera, O. (2014). Spatial and temporal projection of fuelwood and charcoal consumption in Mexico. *Energy for Sustainable Development*, 19(1), 39-46. <https://doi.org/10.1016/j.esd.2013.11.007>

Serrano-Medrano, M., García-Bustamante, C., Berrueta, V. M., Martínez-Bravo, R., Ruiz-García, V. M., Ghilardi, A., y Masera, O. (2018). Promoting LPG, clean woodburning cookstoves or both? Climate change mitigation implications of integrated household energy transition scenarios in rural Mexico. *Environmental Research Letters*, 13(11), 115004. <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1748-9326/aad5b8>

Secretaría de Economía. (2021). *Informe Nacional Voluntario 2021. Agenda 2030 en México*. [https://www.economia.gob.mx/files/gobmx/agenda2030/INV2021\\_F4.pdf](https://www.economia.gob.mx/files/gobmx/agenda2030/INV2021_F4.pdf)

Secretaría de Energía. (2019). *Balance Nacional de Energía 2018*. Sener. [https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/528054/Balance\\_Nacional\\_de\\_Energ\\_a\\_2018.pdf](https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/528054/Balance_Nacional_de_Energ_a_2018.pdf)

Secretaría de Energía. (2022a). *Balance Nacional de Energía 2021*. Sener. <https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/805509/BNE-2021.pdf>

Secretaría de Energía. (2022b). *Sistema de Información Energética*. Sener. <https://sie.energia.gob.mx>

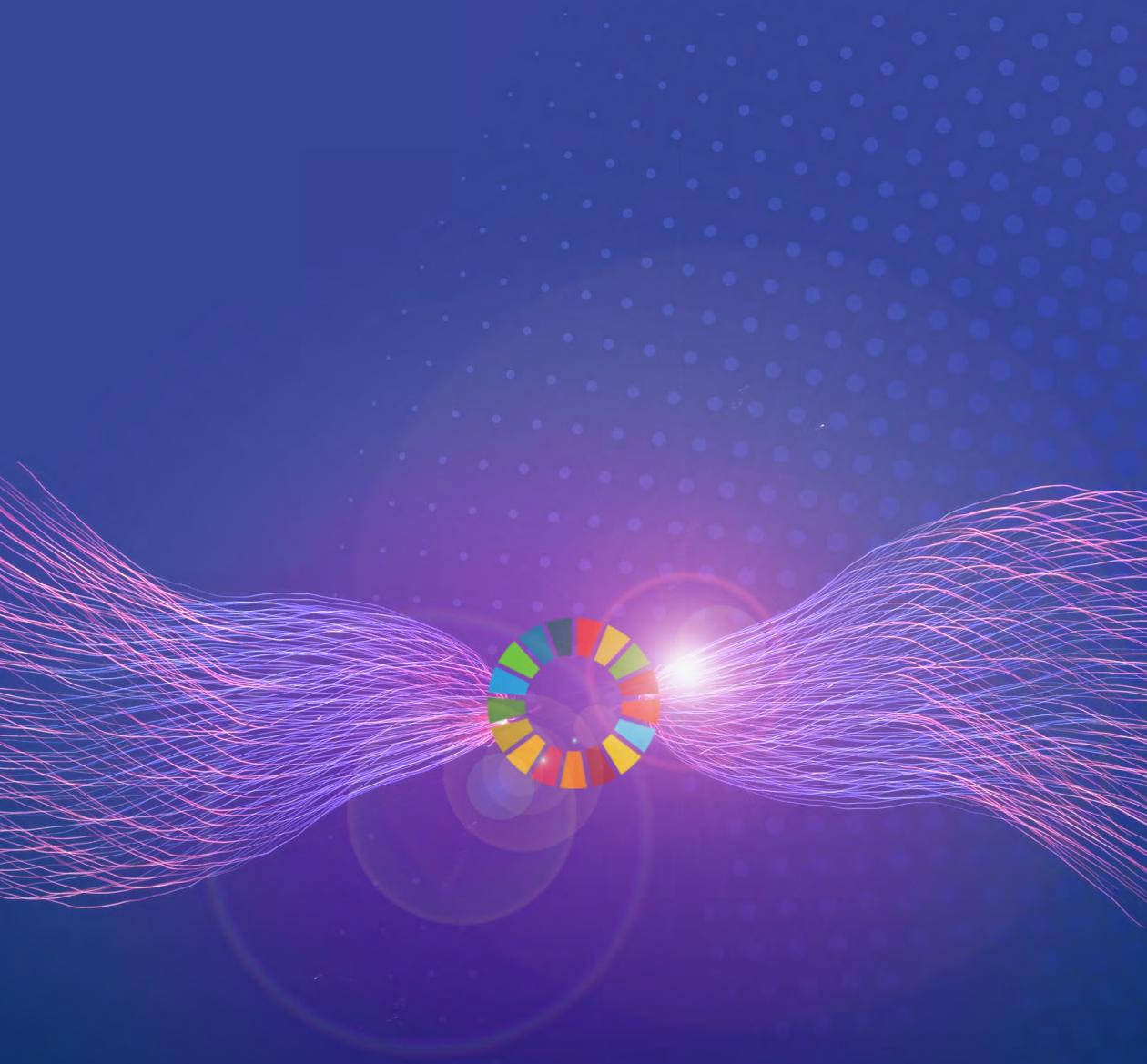
Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. (2018). *Sexta Comunicación Nacional y Segundo Informe Bienal de Actualización ante la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático*. Semarnat. [https://www4.unfccc.int/sites/SubmissionsStaging/NationalReports/Documents/69287541\\_Mexico-BUR2-NC6-2-MEX\\_6aNC\\_Revisada.pdf](https://www4.unfccc.int/sites/SubmissionsStaging/NationalReports/Documents/69287541_Mexico-BUR2-NC6-2-MEX_6aNC_Revisada.pdf)

Sheinbaum, C. (1996). *Tendencias y perspectivas de la energía residencial en México. Análisis comparativo con las experiencias de conservación de los países de la OCDE* [Tesis de doctorado]. Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México.

Smil, V. (2018). *Energy and civilization. A history*. The MIT Press.

Wrangham, R. (2010). *Catching fire: How cooking made us human*. Profile Books Ltd.

Sustentabilidad energética, medioambiente y sociedad: Avances en la Agenda 2030 terminó de editarse en formato electrónico en Ciudad Juárez, Chihuahua, México, en diciembre de 2024. La producción editorial estuvo a cargo de Publicaciones y Difusión de El Colegio de Chihuahua.



El Colegio de  
**Chihuahua**  
Institución Pública de Investigación y Posgrado

