



AGUA *y* ENERGÍA

Actualidad y retos para un desarrollo sostenible



COMUNICACIÓN
CIENTÍFICA

Alberto Coronado Mendoza
Kelly Joel Gurubel Tun
(coordinadores)

Agua y energía:
Actualidad y retos para un desarrollo sostenible

Alberto Coronado Mendoza
Kelly Joel Gurubel Tun
(coordinadores)



**COMUNICACIÓN
CIENTÍFICA**

Ediciones Comunicación Científica se especializa en la publicación de conocimiento científico de calidad en español e inglés en soporte de libro impreso y digital en las áreas de humanidades, ciencias sociales y ciencias exactas. Guía su criterio de publicación cumpliendo con las prácticas internacionales: dictaminación de pares ciegos externos, autenticación antiplagio, comités y ética editorial, acceso abierto, métricas, campaña de promoción, distribución impresa y digital, transparencia editorial e indexación internacional.

Cada libro de la Colección Ciencia e Investigación es evaluado para su publicación mediante el sistema de dictaminación de pares externos y autenticación antiplagio. Invitamos a ver el proceso de dictaminación transparentado, así como la consulta del libro en Acceso Abierto.



www.comunicacion-cientifica.com

[DOI.ORG/10.52501/cc.178](https://doi.org/10.52501/cc.178)




**COMUNICACIÓN
CIENTÍFICA** PUBLICACIONES
ARBITRADAS
HUMANIDADES, SOCIALES Y CIENCIAS

CC+
COLECCIÓN
CIENCIA e
INVESTIGACIÓN

Agua y energía:
Actualidad y retos para un desarrollo sostenible

Alberto Coronado Mendoza
Kelly Joel Gurubel Tun
(coordinadores)



**COMUNICACIÓN
CIENTÍFICA**

Agua y energía : actualidad y retos para un desarrollo sostenible / Alberto Coronado Mendoza y Kelly Joel Gurubel Tun (coordinadores) .— Ciudad de México : Comunicación Científica, 2024. (Colección Ciencia e Investigación).

262 páginas : ilustraciones; 23 × 16.5 centímetros.

ISBN 978-607-9104-27-6

DOI 10.52501/cc.178

1. Recursos energéticos renovables. 2. Agua. 3. Energía Biomásica. I. Coronado Mendoza, Alberto, coordinador. II. Gurubel Tun, Kelly Joel, coordinador.

LC: TJ808 A38

DEWEY: 621.042 A38

Primera edición en Ediciones Comunicación Científica, 2024

La titularidad de los derechos patrimoniales de esta obra pertenece a los autores D.R. Mendoza y Kelly Joel Gurubel Tun (coordinadores), 2024. Su uso se rige por una licencia Creative Commons BY-NC-ND 4.0 Internacional, <https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/legalcode.es>

Diseño de portada: Francisco Zeledón • Interiores: Guillermo Huerta

Ediciones Comunicación Científica, S. A. de C. V., 2024

Av. Insurgentes Sur 1602, piso 4, suite 400

Crédito Constructor, Benito Juárez, 03940, Ciudad de México,

Tel.: (52) 55-5696-6541 • Móvil: (52) 55-4516-2170

info@comunicacion-cientifica.com • www.comunicacion-cientifica.com

 [comunicacioncientificapublicaciones](https://www.facebook.com/comunicacioncientificapublicaciones)  [@ComunidadCient2](https://twitter.com/ComunidadCient2)

ISBN 978-607-9104-27-6

DOI 10.52501/cc.178



Esta obra fue dictaminada mediante el sistema de pares ciegos externos.
El proceso transparentado puede consultarse, así como el libro en acceso abierto,
en <https://doi.org/10.52501/cc.178>

Índice

Presentación	13
I. Percepción de la biomasa como fuente de energía por parte de la población mexicana	
<i>Abril Adriana Angulo Sherman y Valentín Flores Payan</i>	19
Introducción	20
Metodología	25
Resultados	26
Discusión	30
Conclusión	32
Bibliografía	33
II. Análisis de costo beneficio de estudios para el control de inundaciones en localidades urbanas	
<i>Samuel Horacio Cantú Munguía, Aída Lucía Fajardo Montiel y Lourdes G. Cabrera Chavarría</i>	35
Introducción	36
Marco legal de planeación en México	37
Beneficios y costos	39
Caso: Tuxtla Gutiérrez, Chiapas	44
Bibliografía	47

III. Análisis de la situación ambiental de las presas El Cajón y Las Rucias, con énfasis faunístico	
<i>Agustín Camacho Rodríguez, Carlos Vladimir Muro Medina, Edith Xio Mara García y Eduardo Juárez Carrillo</i>	49
Introducción	50
Antecedentes	51
Actividades de campo	54
Resultados	56
Parámetros abióticos de la presa El Cajón	56
Informe faunístico	58
Conclusiones	62
Bibliografía	63
IV. Ecotecnologías como parte de la economía circular para la disminución de la pobreza energética en zonas periurbanas de la Zona Metropolitana de Guadalajara	
<i>Mónica Camas Náfate, Alberto Coronado Mendoza, Mayra Gamboa González y Carlos Jesahel Vega Gómez</i>	65
Antecedentes, las zonas periurbanas	66
Características económicas y sociales generales	67
Descripción de la zona de estudio, Lomas del Centinela	68
Diagnóstico de la pobreza energética	69
Parámetros y herramientas metodológicas	69
Ecotecnologías para la economía circular	77
Estufa solar	78
Deshidratador solar	80
Bibliografía	85
V. Problemática socioambiental del río Santiago: procesos históricos de gestión del agua en un ecosistema vulnerable	
<i>Aida Alejandra Guerrero de León, María Azucena Arellano Avelar, Walter Ramírez Meda, Rodolfo Omar Arellano Aguilar y Alberto Daniel Rocha Muñoz</i>	87
Introducción	88
Descripción de la problemática socioambiental de la subcuenca (CRCV)	89

Descripción de los procesos históricos de gestión del agua en el río Santiago	100
Bibliografía	109
VI. La electromovilidad como estrategia del desarrollo urbano sostenible. ¿Es el automóvil eléctrico un medio de transporte democrático y sostenible en las ciudades mexicanas?	
<i>Daniel Isaac Jiménez Sánchez</i>	115
El desarrollo sostenible	116
El vínculo energético entre automóvil y petróleo	119
La democratización del automóvil en las ciudades y sus consecuencias socioambientales	121
La transición energética y electromovilidad en México	124
Bibliografía	128
VII. Esquemas de producción de ladrillo rojo con menor huella de carbono	
<i>Alejandro Garza Galicia</i>	131
Introducción	132
Desarrollo	135
Base de diseño	138
Instalaciones	140
Resultados	144
Conclusión	148
Bibliografía	149
VIII. Modelado y simulación para ciudades más seguras y sostenibles	
<i>Rachid Marzoug, Beatriz Castillo Téllez, Jesús Águila León, Carlos Jesahel Vega Gómez, Gerardo Alberto Mejía Pérez y Margarita Castillo Téllez</i>	151
Introducción	152
Modelo	154
Resultados y discusión	157
Conclusión	161
Bibliografía	162

IX. Democratización de la energía y transición hacia la electromovilidad sostenible	
<i>Jesús Águila León, Néstor Ortiz Rodríguez y Rachid Marzoug</i> . . .	165
Introducción	166
Contexto energético de México	167
La electromovilidad en México	171
Beneficios y desafíos de la electromovilidad	172
Situación actual de la infraestructura para vehículos eléctricos	173
Democratización de la energía para una transición sostenible a EV	176
Descentralización y acceso a energías renovables	176
Participación ciudadana en la transición energética	177
Modelos de negocios y políticas públicas para la electromovilidad	179
Conclusión	180
Agradecimientos	182
Bibliografía	182
X. Sistemas híbridos basados en energía renovable como posible solución al déficit de electrificación en México	
<i>Ángel Oswaldo Gama Camacho, Kelly Joel Gurubel Tun, Alberto Coronado Mendoza y Natalia Naval Martín</i>	185
Introducción	186
Medición de la pobreza energética	187
Aspectos varios de la pobreza energética	188
Impacto en la salud	188
Accesibilidad a la electricidad	190
Algunas acciones y programas de mitigación	192
¿Propuesta renovable de erradicación en México?	193
Sistemas híbridos basados en energía renovable	196
Tecnologías de almacenamiento	197
Sistemas híbridos eólico-solar (PV-WT)	197
Sistemas híbridos eólico-solar-almacenamiento por baterías (PV-WT-BAT)	198

Sistemas híbridos eólico-solar-diésel-almacenamiento por baterías (PV-WT-DG-BAT)	199
Sistemas híbridos eólico-solar-bombeo hidráulico (PV-WT-HP)	200
Casos de estudio en el mundo	201
Panorama en México	202
Conclusión	204
Bibliografía	204
XI. La recuperación de recursos en las aguas residuales como pilar en la circularidad hídrica y motor de paz positiva	
<i>Luz Marcela Fernández Briseño y Eduardo Parra Ramos</i>	207
Introducción	208
Derecho humano al agua	212
Propuestas técnicas de circularidad	215
Paz positiva aplicada a los conflictos socio hídricos	217
Conclusión	222
Bibliografía	223
XII. Residuos agroindustriales del estado de Chiapas susceptibles a la generación de energía	
<i>Anahí Arreaga Cancino, Aracely López Grijalva y Belkis Sulbarán Rangel</i>	227
Introducción	228
Residuos agroindustriales en el estado de Chiapas	229
Diagnóstico de los residuos viables para conversión energética	231
Usos alternativos de los residuos agroindustriales	234
Ensilaje en la alimentación de animales	235
Infusiones o aperitivos	235
Biofertilizantes	236
Construcción	236
Alternativas de generación energética a partir de los residuos	236
Bibliografía	239
Sobre los autores.	243

Presentación

El agua y la energía son dos bienes esenciales para el desarrollo armónico de la sociedad y el sustento de la vida. Por ello la División de Ingenierías e Innovación Tecnológica, el Instituto de Energías Renovables y el Departamento de Estudios de Agua y la Energía, del Centro Universitario de Tonala de la Universidad de Guadalajara, han organizado dos seminarios de Agua, Energía y Medio Ambiente por una Cultura de Paz.

Johan Galtung (1990), padre del concepto de *cultura de la paz*, identifica cuatro pilares para lograr la paz: (a) reconocer la situación de conflicto, (b) subsanar los efectos traumáticos de la violencia, (c) identificar los intereses legítimos y compartidos de las partes para construir la mediación y (d) alcanzar acuerdos de manera empática, con entendimiento y comprensión entre las partes conflictuadas.

El seminario se desarrolla anualmente y en él se diseña una jornada de trabajo invitando a actores de los diferentes sectores académico, social, gubernamental e industrial en las áreas de agua, energía y medio ambiente. Tiene como objetivo principal identificar, proponer, crear y difundir para estos sectores propuestas de solución a las problemáticas relacionadas con los impactos ambientales, junto con la influencia que tiene en los conflictos sociales por la degradación del medio ambiente.

Algunos de los resultados de los trabajos presentados en esas dos jornadas, realizadas en mayo de 2022 con el tema *Vulnerabilidad de los ecosistemas acuáticos: los ecosistemas como cultura de paz*, y en abril de 2023 con

el tema *Democratización de la energía, por una cultura de paz*, son los que se reúnen en este libro, cuyo objetivo es identificar, crear, proponer y difundir propuestas de solución a las problemáticas relacionadas con los impactos ambientales y su influencia en los conflictos sociales respecto al agua y la energía.

El libro comprende doce capítulos, de los cuales cuatro abordan la temática del agua y ocho la de la energía. Los autores de los diferentes capítulos son profesores investigadores de los diferentes centros universitarios (CU) de la Universidad de Guadalajara, como son CU Tonalá, CU Norte, CU Tlajomulco, CUAAD, CUCBA, así como de otras universidades nacionales y extranjeras. Además, participan estudiantes de maestría y doctorado de diferentes programas educativos, lo cual fortalece y enriquece esta obra que busca acercar el conocimiento de estos temas tan relevantes a la sociedad en un lenguaje comprensivo, que invite al lector a reflexionar sobre las problemáticas actuales en agua y energía, que es necesario resolver de manera participativa para conservar la paz y el desarrollo sostenible de nuestras comunidades.

A continuación, una breve descripción sobre la temática abordada en cada uno de los doce capítulos de esta obra:

CAPÍTULO	TEMÁTICA
<i>Agua</i>	
“Análisis de costo beneficio de estudios para el control de inundaciones en localidades urbanas”	Presenta una metodología para determinar los principales indicadores financieros para el desarrollo e implementación de drenaje pluvial, contrastando los beneficios de hacerlo y el caso de pérdidas económicas en caso de no realizar ninguna intervención.
“Análisis de la situación ambiental de las presas El Cajón y Las Rucias, con énfasis faunístico”	Desarrolla un estudio sobre los humedales aledaños al Centro Universitario de Tonalá, enfatizando la fauna que habita en ellos.

“Problemática socioambiental del río Santiago: procesos históricos de gestión del agua en un ecosistema vulnerable”

Describe primeramente cómo el desarrollo de las comunidades ubicadas a los márgenes del río Santiago era próspero, con una actividad económica fuertemente relacionada con el agua circulante en dicho cuerpo de agua. Posteriormente presenta el caos medioambiental que ha sufrido la zona y sus poblaciones aledañas a causa de diferentes factores que ahí se analizan.

“La recuperación de recursos en las aguas residuales como pilar en la circularidad hídrica y motor de paz positiva”

Plantea cómo en los últimos años se ha incrementado el consumo de agua, por lo que el tratamiento de las aguas residuales de todo tipo es necesario para garantizar que toda la población cuente con este vital líquido, para aprovecharla en las diferentes actividades humanas y así conservar la paz y un desarrollo sostenible.

Energía

“Percepción de la biomasa como fuente de energía por parte de la población mexicana”

Enfatiza fortalecer los procesos educativos y formativos, para que la población conozca sobre este recurso y pueda participar en la toma de decisiones para su aprovechamiento.

“Ecotecnologías como parte de la economía circular para la disminución de la pobreza energética en zonas periurbanas de la zona metropolitana de Guadalajara”

Presenta primeramente una serie de criterios que se han de considerar para evaluar la pobreza energética. Posteriormente aplica esta metodología para evaluar la pobreza energética de una zona marginada en la periferia de la Zona Metropolitana de Guadalajara. Finalmente explora cómo las ecotecnologías, más específicamente cocinas y deshidratadores solares, pueden ayudar a crear proyectos de economía circular que fortalezcan la economía familiar de sus habitantes de una manera sostenible.

“La electromovilidad como estrategia del desarrollo urbano sostenible”

Plantea la pregunta de si la electromovilidad será la respuesta para cumplir los objetivos de desarrollo sostenible 7 y 11, y si realmente esta transición a la electromovilidad es justa e incluyente.

“Esquemas de producción de ladrillo rojo con menor huella de carbono”

Realiza una evaluación del proceso de combustión y transferencia de calor en la industria informal de la producción de ladrillos rojos, lo cual, si bien favorece la economía de familias vulnerables, también es generadora de contaminación y enfermedades para dichas familias. Se propone una alternativa más eficiente que podría ser adoptada por estos grupos vulnerables.

“Modelado y simulación para ciudades más seguras y sostenibles”

Analiza la probabilidad de accidentes y su fatalidad mediante el modelado y simulación, considerando diferentes parámetros, como el número de vehículos, la velocidad, las intersecciones, entre otros.

“Democratización de la energía y transición hacia la electromovilidad sostenible”

Aborda diferentes áreas relacionadas con la electromovilidad para que esta transición pueda considerarse sostenible; entre ellas, los modelos de negocio, infraestructura de recarga, generación distribuida y políticas públicas de incentivos focalizados según necesidades demográficas, lo cual aporta una serie de recomendaciones para una transición exitosa.

“Residuos agroindustriales del Estado de Chiapas susceptibles a la generación de energía”

Destaca cómo los residuos agroforestales, como la caña de azúcar, el plátano, el maíz y el café, entre otros, han crecido en los últimos años y son poco aprovechados para la generación de energía y su correspondiente apoyo en la reducción de la huella de carbono. Se analiza cómo la tecnología y procesos actuales pueden ser implementados para el aprovechamiento de estos residuos.

“Sistemas híbridos basados en energía renovable como posible solución al déficit de electrificación en México”

Desglosa algunos aspectos relacionados con el acceso a la electricidad, la medición de la pobreza energética y su impacto en la salud, describiendo cuáles han sido algunas de las acciones de mitigación en México y en el mundo; además, propone diferentes configuraciones de sistemas híbridos basados en energías renovables.

Se espera que la lectura de esta obra brinde a la persona lectora conocimiento y esperanza para construir, de manera colaborativa e interdisciplinaria, soluciones a las problemáticas abordadas.

DR. ALBERTO CORONADO MENDOZA
*Director del Instituto de Energías Renovables,
Centro Universitario de Tonalá,
Universidad de Guadalajara*
Septiembre de 2023

I. Percepción de la biomasa como fuente de energía por parte de la población mexicana

ABRIL ADRIANA ANGULO SHERMAN*

VALENTÍN FLORES PAYAN**

DOI: <https://doi.org/10.52501/cc.178.01>

Resumen

Este capítulo presenta el análisis de los resultados de una encuesta piloto realizada a inicios de 2023 con el propósito de mostrar la comprensión que tiene la población del concepto *biomasa* y si ésta se encuentra relacionada con la obtención de energía. A pesar de que la biomasa es considerada por la comunidad académica una fuente de energía renovable —la segunda de mayor potencial para México—, el conocimiento de la población en general sobre este tema parece moderado. Los resultados de esta encuesta ayudan a determinar el dominio que la población muestra sobre la biomasa, los bioenergéticos y los biocombustibles. Estos resultados son contrastados con los de una encuesta piloto realizada en 2022 y permiten sugerir la relevancia de promover la educación sobre estos temas, de manera que la población pueda tomar decisiones informadas sobre el aprovechamiento de la biomasa como energía.

Palabras clave: *Biomasa, bioenergía, biocombustibles, energías renovables, México.*

* Doctora en Ciencias en Ingeniería y Física Biomédicas. Departamento de Estudios del Agua y de la Energía, Centro Universitario de Tonalá, Universidad de Guadalajara, México. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9529-9882>

** Doctor en Ciencia y Tecnología en Ingeniería Ambiental. Departamento de Ciencias Básicas, Centro Universitario de Tonalá, Universidad de Guadalajara, México. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3849-7107>

Introducción

El término biomasa proviene del inglés *biomasa*, que hace referencia a materia de origen biológico. Esto da como resultado una definición muy extensa y aplicada en diferentes áreas del conocimiento. Cuando se busca su definición en fuentes formales, es posible encontrar dos definiciones: la primera, la más antigua, hace referencia a la cantidad de materia compuesta por los seres vivos en un hábitat y puede ser presentada en función de unidades de área o volumen (Merriam-Webster, s. f.; RAE, s. f.) (figura 1).

Figura 1. La definición clásica de biomasa describe el volumen ocupado por los seres vivos; por ejemplo, los peces en un cuerpo de agua, las plantas y árboles en un área boscosa o los animales en un área de un ecosistema



Fuente: Collage obtenido de Pixabay, Shutterstock y RGBStock.

La segunda definición se refiere a la materia que proviene de plantas, desechos animales o cualquier materia orgánica que se haya generado durante un proceso biológico; ya sea de forma fortuita o intencionalmente, y que puede ser aprovechada como combustible, una fuente de energía (Biomass, n.d; Biomasa, n.d.) (figura 1.2).

Figura 2. La definición más reciente de biomasa se refiere al aprovechamiento de material biológico para su conversión en energía, generalmente residuos y ocasionalmente cultivos energéticos



Fuente: Collage obtenido de Pixabay, Shutterstock y RGBStock.

Debido a lo extensa que puede resultar su definición, es posible encontrar su inclusión o aplicación en distintas áreas del conocimiento para referirse a términos más específicos; por ejemplo, al referirse a especies particulares como vegetales o animales, indica biomasa de especie (*species biomass*) (Britannica, 2022). Podemos también hacer mención de todas las especies de una comunidad o delimitarlas por aspectos particulares (Britannica, 2022) y utilizar la definición de biomasa. Lo anterior puede implicar que la interpretación de este término depende de la frecuencia con que se utiliza para describir un significado en particular, y esto a su vez depende también de las áreas de formación profesional de las personas que los utilizan. Esto último implica que, cuando las personas escuchan la palabra biomasa, es posible que no la asocien directamente con la obtención de energía, a pesar de que se considera que México tiene un gran potencial para el aprovechamiento de biomasa, comparada con otras fuentes alternativas (Pérez-Denicia *et al.*, 2017).

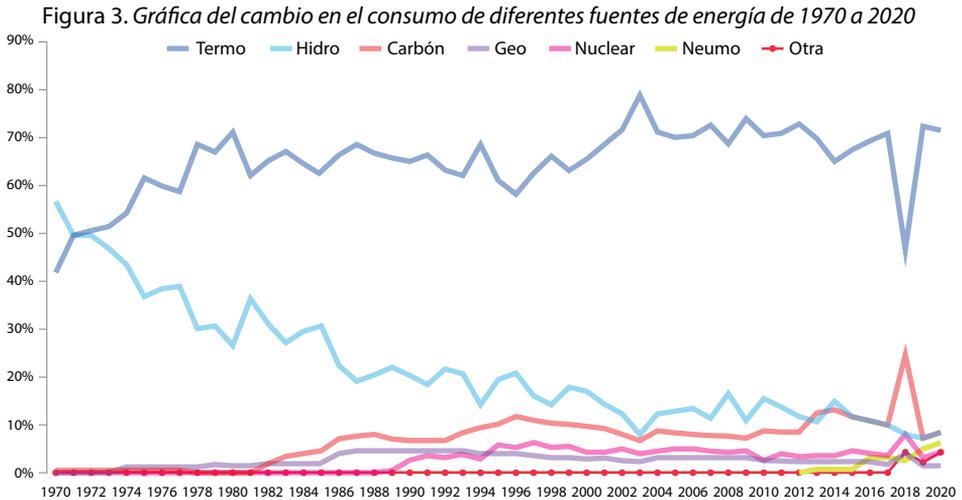
En 2017, Pérez-Denicia *et al.* publicaron un trabajo orientado al aprovechamiento de energías renovables para la generación de energía eléctrica en México, en el que se menciona el estatus de la generación de energía eléctrica del país a partir de fuentes renovables, así como su potencial energético. De acuerdo con esta publicación, la biomasa destaca como una alternativa atractiva a nivel nacional, ya que representa un potencial energético de 2 396 GWh/año (Pérez-Denicia *et al.*, 2017). Cabe destacar que, sobre las diferentes publicaciones consultadas hasta 2017 en México, los temas principales acerca del aprovechamiento de energías renovables se encontraban distribuidos así: 41% sobre energía solar, 26% sobre energía de la biomasa, 15% sobre energía eólica y 10% para otros tipos de fuentes de energía (Pérez-Denicia *et al.*, 2017). Lo anterior hace evidente que la obtención de energía mediante el uso de biomasa se ha convertido en un tema destacado entre las energías renovables. Sin embargo, aun considerando las políticas públicas implementadas para el aprovechamiento de las energías renovables, no han tenido impacto (Sánchez, Segovia y López, 2023; Pischke *et al.*, 2019). De acuerdo con la reciente publicación de Sánchez, Segovia y López (2023), donde se realiza un análisis de las fuentes de energía destinadas a la producción de energía eléctrica en México, señala que desde la década de 1970 se ha incrementado la obtención utilizando fuentes no renovables.

En 2020, la aportación de estas fuentes fue de 82% (72% termoeléctricas y 10% carbón); en contraste, el uso de energías renovables ha disminuido destaca el decremento en el aprovechamiento de plantas hidroeléctricas, cuya contribución representaba 57% en la década de 1970, pero en 2020 alcanza sólo 9%. El cambio en el consumo puede apreciarse en la figura 3. Además, destaca que, entre las energías renovables, el número de plantas eólicas ha incrementado de forma constante durante los cinco años previos al 2020, hasta alcanzar 6% en su aportación para la producción de energía eléctrica. Otras fuentes renovables, como la biomasa, se encuentran comprendidas en conjunto con el resto de las fuentes renovables y representan 3% de la contribución. Además, parte de las ventajas de su aprovechamiento, en contraste con otras fuentes renovables de energía, es que en ciertas comunidades, con planificación en su procesamiento (Váldez-Vázquez, Acevedo-Benítez y Hernández-Santiago, 2010), puede convertirse en una fuente con mayor estabilidad (Sánchez, Segovia y López, 2023), aunque es importante entender sus limitantes en relación con el crecimiento de la demanda energética nacional (Rios y Kaltschmitt, 2013).

Sobre el consumo a nivel nacional, es necesario considerar la encuesta realizada en 2018 por parte del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), con el propósito de generar información estadística que permita conocer los patrones de consumo energético de las viviendas en México (SENER y CONUEE, 2018). Dicha encuesta ha sido presentada por el INEGI como el primer estudio orientado a la población mexicana para adquirir información del consumo de energía en diferentes tipos de hogares (Mascorro *et al.*, 2023). Entre las fuentes de energía para el suministro de electricidad, se logró identificar que sólo en 1% de los hogares se incluyen algunas fuentes alternativas, incluidas la renovables, entre las que sobresale la energía solar obtenida con paneles solares. Las viviendas que cuentan con suministro solar de forma exclusiva representan 0.25%; el porcentaje restante (0.75%) se logra gracias a sistemas bidireccionales o híbridos, en los que el suministro se complementa a través de la red pública.

La energía solar se aprovecha también para otras actividades domésticas en forma térmica, mediante calentadores de agua en 28% de estos hogares. Entre los resultados de este estudio, a pesar de que no se menciona como energía proveniente de la biomasa, se incluye la leña, en conjunto con el

carbón, como una de las fuentes utilizadas en los hogares mexicanos: en actividades de cocina (11%) y en los calentadores de agua (10%).



Fuente: Elaboración a partir de Sánchez, Segovia y López (2023).

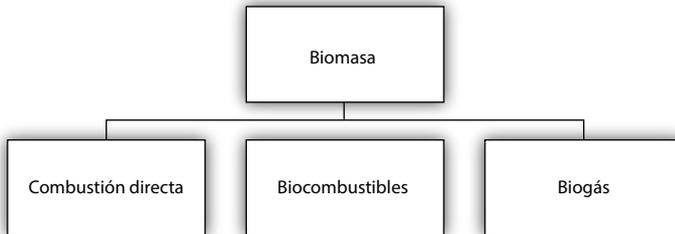
Se sabe que la biomasa puede ser aprovechada en tres formas diferentes (Pérez-Denicia *et al.*, 2017), como se muestra en la figura 4: (a) calor y poder calorífico, (b) biocombustibles y (c) biogás. La primera se refiere a la forma tradicional de aprovechamiento de la biomasa como energía, que consiste en quemarse, como ocurre, por ejemplo, con la quema de leña como combustible. La segunda se refiere a la producción de combustibles líquidos que se obtienen por medio de procesos bioquímicos y termoquímicos; ejemplo de ello son el biodiesel y el bioetanol. La tercera corresponde a la mezcla de diferentes hidrocarburos, incluido el metano, que al quemarse puede utilizarse para producir calor y electricidad. En el caso de México, en particular, la mejor forma de aprovechamiento corresponde a la combustión directa de biomasa y la producción de biogás (figura 4).

Además, para lograr un mayor beneficio, se propone buscar otras fuentes de biomasa además del bagazo de caña y la leña, que son los más utilizados en el país. Utilizar otro desecho como alternativa y proveerse de un tratamiento apropiado permitirá un aprovechamiento más limpio y seguro para producir energía eléctrica y, consecuentemente, incrementar

el uso de la biomasa en la canasta energética nacional (Pérez-Denicia *et al.*, 2017).

Ahora bien, es importante reconocer las consecuencias que se derivan de utilizar la biomasa como fuente de energía. Por un lado, se considera que la tecnología que permite producir energía eléctrica tiene un impacto ambiental positivo a largo plazo en costo-beneficio; por otro, el aprovechamiento mediante la utilización de cultivos como la jatropha, el aceite de palma, maíz, soja o caña azucarera, implica un mayor impacto ambiental en comparación con la quema de combustibles fósiles, porque, a pesar de que los combustibles fósiles emiten una menor cantidad de gases de efecto invernadero, poseen un costo ambiental y ecológicamente mayor en términos de pérdida de biodiversidad, degradación de la tierra agrícola y contaminación ambiental en general (Pérez-Denicia *et al.*, 2017).

Figura 4. Formas de aprovechar la biomasa para obtener energía, se destacan la combustión directa y la producción de biogás como las de mayor potencial para México



Fuente: Elaboración propia.

México posee potencial para aprovechar la biomasa y obtener energía, y resulta relevante determinar si la población la reconoce como una de las alternativas entre las energías renovables, así como los bioenergéticos y biocombustibles que se pueden obtener mediante ella. Los resultados presentados en esta entrega corresponden a la continuación de una encuesta piloto realizada durante 2022, con la participación de población mexicana adulta para analizar su reconocimiento y percepción sobre la biomasa y los bioenergéticos (Mascorro *et al.*, 2023). En este trabajo se ha extendido el rango de edad para abarcar población desde los 15 años, incluyendo a personas que pueden estar en el proceso formativo de la educación media superior.

Metodología

En este trabajo se analiza la capacidad que tiene la población de reconocer el término *biomasa* desde la perspectiva energética, esto es, como un recurso que puede aprovecharse para ser transformado en energía y que se asocia con las energías renovables. Para este propósito se realizó una encuesta que fue aplicada en una población donde los participantes tenían al menos 15 años cumplidos. La encuesta consta de diecinueve preguntas, de las cuales tres corresponden a aspectos cualitativos del individuo, cuatro están relacionadas con su formación profesional, cuatro valoran el conocimiento previo sobre el uso de energías renovables y ocho están orientadas al concepto de biomasa y los bioenergéticos que se derivan de la misma. Al igual que para la encuesta piloto, se hizo la estimación del coeficiente alfa de Cronbach para la encuesta se obtuvo $\alpha = 0.759$, de acuerdo con la ecuación 1, donde k corresponde al número de ítems, v_i se refiere a la varianza asociada a cada ítem y v_t es la varianza asociada a la suma lograda por medio de los ítems (Ledesma, Molina y Valero, 2002).

$$\alpha = \frac{k}{k-1} \left(1 - \frac{\sum v_i}{v_t} \right) \quad (1)$$

El valor no considera las preguntas de carácter cualitativo nominal. Estas preguntas se presentan para identificar características de la población que se espera que, al extender el estudio a más personas, permita identificar tendencias que puedan estar relacionadas con características como el género, la edad, el nivel educativo alcanzado, etcétera.

Es importante destacar que durante la encuesta piloto se obtuvo un $\alpha = 0.848$ (bueno) (Mascorro *et al.*, 2023), lo cual elimina los reactivos de carácter cualitativo nominal. Considerando lo anteriormente mencionado, es posible identificar que el valor alfa de Cronbach para estos resultados ($\alpha = 0.759$) se considera aceptable (George y Mallery, 2003).

A pesar de que entre los reactivos cualitativos se incluyeron preguntas que pueden permitir un análisis en función de la edad, el nivel educativo o el sexo del entrevistado, éstas se reservarán con el propósito de poder in-

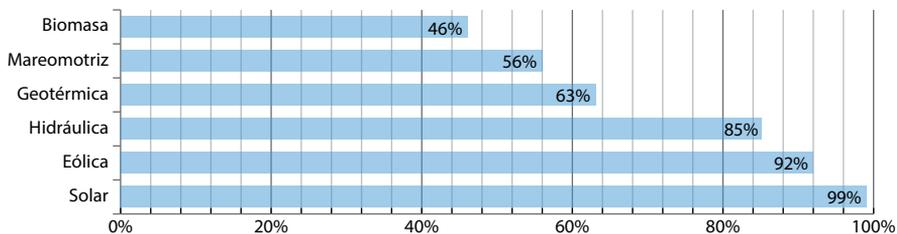
crementar la participación de más individuos en la encuesta y presentar un análisis más profundo de acuerdo con estos criterios. Se incluyen sólo algunas perspectivas relacionadas con los rangos de edad de los individuos.

Resultados

La encuesta se aplicó a una población de 161 individuos mayores de 15 años, de los cuales 61% ha concluido sus estudios universitarios. Se entrevistó a individuos de las diferentes disciplinas profesionales; su distribución es la siguientes: 37% de ingeniería y tecnología, 24% de ciencias sociales y administrativas, 13% de educación, humanidades y artes; las áreas de ciencias de la salud y ciencias naturales y exactas tuvieron una participación de 10%, ciencias agropecuarias tuvo una participación de 2% y 4% de la población no identificó su formación entre ninguna de las áreas previamente mencionadas. La población fue encuestada durante el mes de marzo de 2023.

De la población, 98% reconoce haber escuchado en algún momento acerca de las energías renovables. En la figura 5 se ilustran las energías renovables de las que la población tiene conocimiento. La energía solar es reconocida por 99% de la población encuestada, seguida de la eólica (92%) y la hidráulica (85%). Entre las menos conocidas se encuentran la energía geotérmica, la mareomotriz y la biomasa. Sólo 46% de la población reconoce que se puede obtener energía de la biomasa, lo que la convierte en la fuente menos conocida.

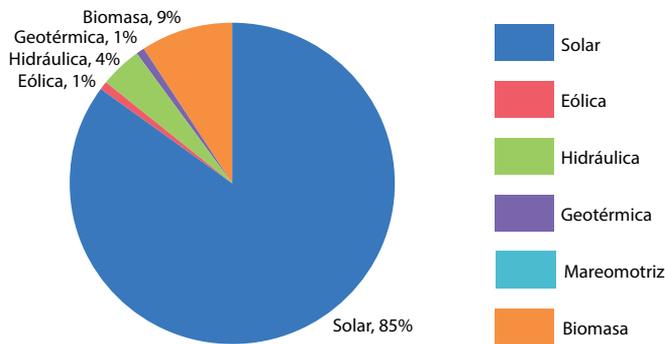
Figura 5. Frecuencia con la que las personas han escuchado sobre las diferentes energías renovables



Fuente: Elaboración propia.

A pesar de que casi toda la población es capaz de identificar al menos una fuente de energía renovable, sólo 61% utiliza en su vida cotidiana algún tipo de ésta. La fuente más utilizada por este sector de la población es la solar (85%), seguida por la biomasa (9%), la hidráulica (4%), la geotérmica (1%) y la eólica (1%). La energía mareomotriz no es utilizada por esta parte de la población. Para ilustrar la distribución de los energéticos que los encuestados dicen utilizar, se presentan los porcentajes en la figura 6.

Figura 6. Fuentes de energía que las personas que utilizan energías renovables dicen utilizar



Fuente: Elaboración propia.

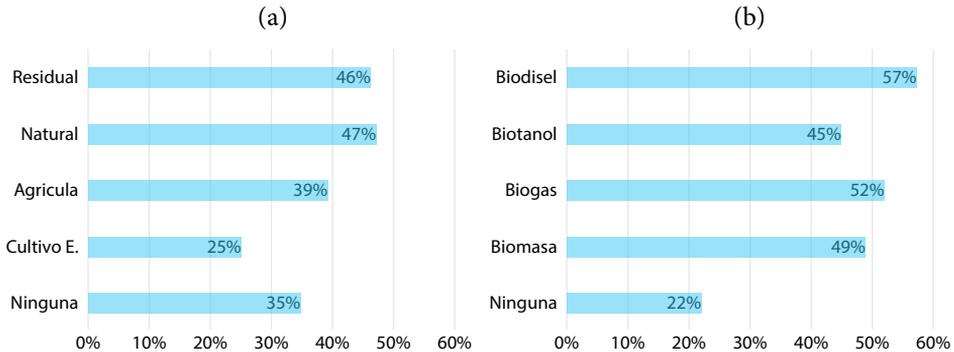
A continuación se detallan los hallazgos reportados en la encuesta relacionados con los conceptos de biomasa y bioenergéticos que se pueden obtener de ella. De la población, 62% indica conocer el concepto de biomasa, aunque solamente 46% lo comprende como una fuente de energía. Además, cuando se les preguntó a los individuos sobre el término *bioenergético*, 33% de la población indicó que tanto biomasa como bioenergético son lo mismo.

A la población se le dio a escoger cuatro tipos en los que se clasifica la biomasa: agrícola, cultivo energético, natural y residual, para indicar cuáles de ellos han escuchado previamente. Así, 65% de la población reconoce alguno de estos términos en el siguiente orden: la biomasa natural (47%) y residual (46%), luego la biomasa agrícola (39%) y cultivo energético (25%); este último es el menos popular. Los resultados descritos aparecen reportados en la figura 7 (a).

Se le preguntó también a la población si había escuchado previamente del término *bioenergía*; 77% de la población indicó conocerlo. Cuando a la

población se le ofreció identificar entre cuatro opciones de bioenergético (biodiesel, bioetanol, biogás, biomasa), 57% de las personas reconocieron el término biodiesel, 52% biogás, 49% biomasa y 45% bioetanol; 22% indicaron que no reconocían ninguno de los bioenergéticos de la lista (figura 7 [b]).

Figura 7. (a) Tipos de biomasa que la población entrevistada dice reconocer.
(b) Tipos de bioenergéticos que la población entrevistada dice reconocer



Fuente: Elaboración propia.

Por último se le preguntó a la población cómo consideraba la relevancia sobre el conocimiento de estos términos y cómo se relacionan con el impacto en el medio ambiente. Sobre estos puntos toda la población entrevistada indica que los temas son relevantes y 91% desearía recibir más información al respecto. En relación con el impacto negativo sobre el medio ambiente que puede tener el uso de la biomasa como fuente de energía, sólo 18% considera que su aprovechamiento puede tener un impacto negativo.

Además de lo mencionado anteriormente, de estas encuestas realizadas se observó el comportamiento de la percepción de la biomasa en una población tomando en cuenta su edad. Se hizo la estimación del coeficiente alfa de Cronbach por rango de edad separadas por intervalos de cinco años (figura 8).

Figura 8. Resultados del alfa de Cronbach por edades

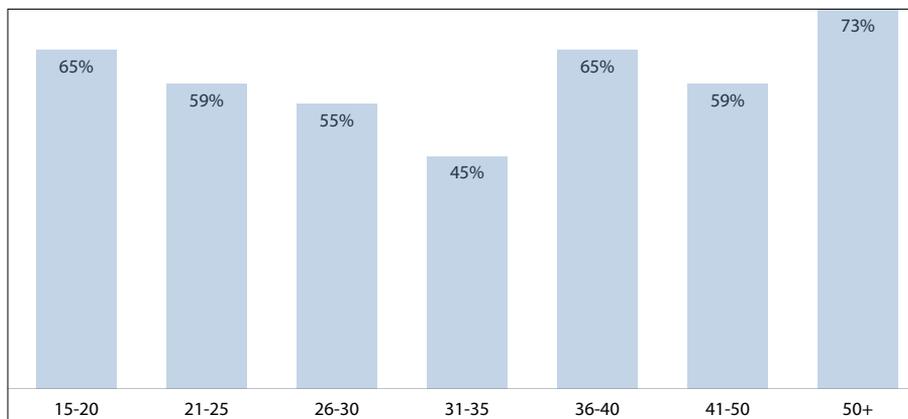
Edad	15-20	21-25	26-30	31-35	36-40	41-50	50+	Todos
Individuos	17	22	18	24	23	27	30	161
α	0.7946	0.8484	0.7184	0.8153	0.6518	0.7622	0.7448	0.7591

Fuente: Elaboración propia.

En general, los valores alfa que se obtuvieron se consideran en los rangos de aceptables y buenos, pues casi todos los resultados del coeficiente alfa están en un rango por encima de 0.7, lo cual genera una confiabilidad en las encuestas realizadas a la población; sin embargo, se considera que en el rango de edad de 36-40 el valor obtenido puede ser considerado cuestionable. Esto nos lleva a suponer que probablemente la población se encuentra en lo común, es decir, la mayor parte del grupo de la población no tuvo respuesta relevantes.

Muchas de las respuestas no difieren de acuerdo con el rango de edad; por ejemplo, la energía más conocida en cada grupo es la solar y la menos conocida es la biomasa. En cuanto a los bioenergéticos, el más conocido es el biodiesel y el menos conocido el biogás.

Figura 9. Resultados por rango de edades, derivados de la pregunta: "¿Usted o su familia utilizan estas energías en su vida cotidiana?"



Fuente: Elaboración propia.

Uno de los resultados que destacan al considerar el rango de edad es el relacionado con el uso cotidiano de alguna fuente de energía renovable. La población de 50 años en adelante es la que más indica utilizar alguna de estas fuentes (73%), mientras que las personas en el rango de 31 a 35 años indican utilizarla menos (45%), como puede observarse en la figura 9.

Cabe destacar que las personas de 50 años también indican reconocer principalmente el bioetanol y biomasa como bioenergéticos, lo cual no sucede para otras poblaciones.

Discusión

Entre los resultados obtenidos es importante tener en cuenta los recabados previamente (Mascorro *et al.*, 2023). En ambos casos se destaca que, independientemente del área de formación profesional, la mayoría de los individuos reconocen las energías renovables. Además, considerando los resultados del Encevi sobre el uso de energías alternativas en los hogares mexicanos, es posible decir que los resultados obtenidos en esta encuesta se encuentran en concordancia (SENER y CONUEE, 2018; Mascorro *et al.*, 2023): de la población que utiliza energías renovables de forma cotidiana, 85% utiliza energía solar. Estos resultados concuerdan con que la energía solar es por igual la más conocida y la más aprovechada por la población. Es notable también que las otras energías renovables más conocidas sean la eólica e hidráulica (92% y 85%, respectivamente), aun cuando sólo 4 y 1% de la población que usa energías renovables la utiliza. Además, teniendo en cuenta la encuesta piloto realizada, destaca el hecho de que, independientemente de la inclusión de una población más extensa, la proporción de individuos que indican utilizar las energías renovables es la misma: 61%.

En cuanto a la biomasa, a pesar de ser la fuente renovable menos conocida por la población en general, entre las personas que reconocen utilizar energías renovables es la segunda más utilizada, pues la aprovecha 9% de la población. De acuerdo con el Encevi, el uso de la biomasa aún se encuentra en combustibles como la leña (SENER y CONUEE, 2018), pero no se considera alguna otra alternativa para ser aprovechada para que su uso se extienda, a pesar del potencial que existe para este recurso en México (Pérez-Denicia *et al.*, 2017). Considerando lo anterior, podemos intuir que, a pesar del interés percibido por la comunidad académica y sus esfuerzos para promover su aprovechamiento, parece que la población no identifica el potencial que existe en esta fuente de energía comparada con otras. Esto justificaría por qué su aprovechamiento es tan moderado y al mismo tiempo anticuado, pues se utiliza sólo como combustible (Pérez-Denicia *et al.*, 2017; SENER y CONUEE, 2018; Mascorro Guzmán *et al.*, 2023).

Considerando lo anteriormente expuesto, es pertinente analizar la identificación y distinciones que la población puede hacer entre los tipos de

biomasa y bioenergéticos. Anteriormente se había propuesto que el motivo por el que la biomasa residual pueda encontrarse entre las más conocidas puede deberse a que el término se asocia con el de *residuos orgánicos*, que la población podría relacionar con la actividad cotidiana de la recolección de residuos (Mascorro *et al.*, 2023). De acuerdo con los hallazgos de este trabajo, es posible identificar que *biomasa residual* es uno de los términos más reconocidos por la población, en conjunto con el de *biomasa natural*. En contraste, el de cultivo energético, que se refiere a la producción intencional de biomasa vegetal con el propósito exclusivo de producir energía, es el tipo de biomasa menos conocida, lo cual puede relacionarse con el hecho de que la población en general no vincula la producción de energía con la biomasa.

En relación con los bioenergéticos, se identifica que el biodiesel es el más conocido por la población, lo que coincide con los resultados de la encuesta piloto. En este estudio en particular se observa que tanto el biogás como la biomasa (leña) también son reconocidos por cerca de la mitad de la población. Esto es relevante, porque los procesos más atractivos para la obtención de energía en México deben ser los relacionados con la producción de biogás y biomasa (combustible sólido), mientras que la producción de biodiesel no es particularmente atractiva para el país (Pérez-Dencia *et al.*, 2017). Resulta pertinente que se brinde información a la población sobre aquellos recursos que se pueden aprovechar de la biomasa para producir energía, así como el tipo de bioenergéticos que se derivarían de la misma para México. Con esto se invita a la población a reflexionar sobre aquellos bioenergéticos que tienen mayor posibilidad de producirse dado el contexto del potencial nacional.

Es alentador que la población indique reconocer la relevancia de estos temas hacia el final de la encuesta, pues esto señala que tanto la biomasa como las bioenergéticos son útiles, además de indicar que se desea recibir más información sobre estos temas. Sin embargo, es importante que, en conjunto con la promoción de la biomasa, se considere también la concientización sobre el impacto ambiental negativo que su aprovechamiento puede traer consigo (Pérez-Dencia *et al.*, 2017), sobre todo porque un número significativo de la población supone que dichas consecuencias no existen.

Como se ha mencionado, México tiene un gran potencial para el aprovechamiento de la biomasa como fuente de energía. Sin embargo, los resultados de las encuestas medidas por rango de edades indican que, por parte de la población general mayor a los 15 años, el término biomasa no se asocia con la obtención de energía. La población que parece más indiferente a estos temas es la del rango de 31 a 35 años, mientras que la más consciente parece la de 50 años en adelante. Lo anterior puede deberse a la etapa de vida en que se encuentran los individuos o a que son más empáticos por las experiencias que han vivido y es su momento de disfrutar la vida. Pero ésta es una hipótesis que debe ser analizada con más detenimiento.

Conclusión

Es indispensable reconocer el potencial que existe en México para el aprovechamiento de la biomasa como fuente de energía, aunque aparentemente una parte significativa de la población no se encuentra familiarizada con la idea de que es un recurso que puede explotarse para obtener energía por diferentes medios para la producción de bioenergéticos. Además de la concientización sobre los beneficios de su aprovechamiento, es importante que la población también conozca la mejor manera de explotar este recurso mediante los bioenergéticos y las implicaciones ambientales que conlleva la cadena de producción, como se sugirió con los resultados en la encuesta piloto (Mascorro *et al.*, 2023).

Debido a que una de las tareas sustantivas de las universidades es la difusión de la ciencia, por medio de estas instituciones que deben promoverse estrategias para compartir información con la población sobre la biomasa y los bioenergéticos. Lo anterior no debe limitarse a los estudiantes universitarios, sino extenderse hacia más niveles educativos, teniendo en cuenta que, de acuerdo con los reportes de la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos (OCDE) sobre la educación, la población mexicana que obtiene un título profesional y la que termina la preparatoria son escasas en comparación con otras naciones (< 30% en ambos casos); incluso aquellas que terminan la secundaria alcanzan apenas 44% de la población (OECD, 2022). Considerando el contexto educativo en México, es conve-

niente extender estos conocimientos a los niveles básicos de la educación si se pretende alcanzar la mayor población posible.

Al igual que con los resultados de la encuesta piloto, esta encuesta aporta información relevante, pertinente y fiable. Es conveniente que la implementación de ésta continúe de tal manera que se pueda recabar más información de forma accesible y pertinente, teniendo en cuenta factores como la edad, el nivel educativo y el sexo del entrevistado, todo con el propósito de mejorar el conocimiento que tiene la población mexicana sobre la biomasa y los bioenergéticos que de ella se derivan.

Bibliografía

- Biomass. (n.d.). In Merriam-Webster.com Dictionary. Merriam-Webster. <https://www.merriam-webster.com/dictionary/biomass>
- Biomasa. (n.d.). In Diccionario de la lengua española. Real Academia Española. <https://dle.rae.es/biomasa?m=form>
- The Editors of Encyclopaedia Britannica. (2022, September 28). Biomass. Encyclopedia Britannica. <https://www.britannica.com/science/biomass>
- Pérez-Dencia, E., Fernández-Luqueño, F., Vilariño-Ayala, D., Manuel Montaña-Zetina, L., y Alfonso Maldonado-López, L. (2017). Renewable energy sources for electricity generation in Mexico: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 78. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.05.009>
- Sanchez, S. F., Segovia, M. A. F., y López, L. C. R. (2023). Estimating a national energy security index in Mexico: A quantitative approach and public policy implications. *Energy Strategy Reviews*, 45, 101019.
- Pischke, E. C., Solomon, B., Wellstead, A., Acevedo, A., Eastmond, A., De Oliveira, F., ... y Lucon, O. (2019). From Kyoto to Paris: measuring renewable energy policy regimes in Argentina, Brazil, Canada, Mexico and the United States. *Energy Research y Social Science*, 50, 82-91.
- Valdez-Vazquez, I., Acevedo-Benítez, J. A., y Hernández-Santiago, C. (2010). Distribution and potential of bioenergy resources from agricultural activities in Mexico. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14(7), 2147-2153.
- Rios, M., y Kaltschmitt, M. (2013). Bioenergy potential in Mexico—status and perspectives on a high spatial distribution. *Biomass Conversion and Biorefinery*, 3(3), 239-254.
- SENER, CONUEE, I. (2018). Encuesta Nacional sobre Consumo de Energéticos en Viviendas Particulares. Presentación de Resultados. SENER.
- Mascorro Guzmán, J. A., Vásquez-Olmos, J., Zúñiga-Sánchez, O., Monteros-Curiel, E., Durand-Moreno, L. C., Flores-Payan, V., y Angulo-Sherman, A. A. (2023). Perception

- of energy production from biomass: A Mexican population pilot survey. *BioRxiv*, 2023.06.27.546801. <https://doi.org/10.1101/2023.06.27.546801>
- Ledesma, R., Molina, G., y Valero, P. (2002). Análisis de consistencia interna mediante Alfa de Cronbach: un programa basado en gráficos dinámicos. *Psico-USF*, 7(2), 143-152.
- George, D., y Mallery, P. (2003). *SPSS for Windows step by step: A simple guide and reference* (4th ed.). 11.0 update.
- OECD. (2022). *Education at a Glance 2022*. <https://doi.org/10.1787/3197152b-en>

II. Análisis de costo beneficio de estudios para el control de inundaciones en localidades urbanas

SAMUEL HORACIO CANTÚ MUNGUÍA*

AÍDA LUCÍA FAJARDO MONTIEL**

LOURDES G. CABRERA CHAVARRÍA***

DOI: <https://doi.org/10.52501/cc.178.02>

Resumen

En la actualidad, debido a los efectos del cambio climático y del desarrollo urbano sobre el ciclo hidrológico, se hacen imperativas la elaboración y la construcción de proyectos de drenaje pluvial, los cuales deben ser desarrollados cumpliendo con toda la normatividad aplicable. La evaluación económica de un proyecto de infraestructura pluvial se basa en la determinación de las ventajas que ofrecerá a la población, en comparación con la inversión requerida para la construcción del sistema. La metodología para la evaluación económica presentada en el presente trabajo cumple con todos los requerimientos exigidos por la Comisión Nacional del Agua (Conagua) y la Secretaría de Hacienda y Crédito Público (SHCP), y se basa en la comparación de dos escenarios: uno con proyecto y otro sin proyecto, de lo cual se obtienen los beneficios buscados. Los beneficios del proyecto se componen de los siguientes conceptos: ahorros por la reducción en daños en el menaje de viviendas, constituido por el mobiliario y enseres domésticos, así como daños al inmueble de las viviendas afectadas. La estimación económica de los daños se realiza mediante la metodología del daño anual esperado (DAE), obtenido con base en las manchas de inundación, las alturas de inundación

* Maestro en Ingeniería de Proyectos. Departamento de Ciencias Básicas, Aplicadas e Ingenierías, Universidad de Guadalajara, México.

** Doctora en Ingeniería y Tecnología. Departamento del Agua y la Energía, Universidad de Guadalajara, México. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6523-7477>

*** Doctora en Agua y Energía. Centro Universitario de Tonalá, Universidad de Guadalajara, México. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5223-0295>

y la clasificación del tipo de vivienda. Se obtienen los indicadores de rentabilidad requeridos (VAN, TIR TRI) y se realizan análisis de sensibilidad para determinar los principales riesgos a los que se pudiera enfrentar el proyecto.

Palabras clave: *Inundación, análisis costo beneficio, análisis de costo.*

Introducción

Los peligros relacionados con el agua pueden ser excepcionalmente destructivos, y el impacto del cambio climático en eventos extremos relacionados con el agua como éstos es cada vez más evidente. La frecuencia y la intensidad de los episodios de precipitaciones intensas han aumentado desde la década de 1950 en la mayor parte de la superficie terrestre, en la que los datos de observación son suficientes para el análisis de tendencias; y es probable que el cambio climático antropogénico sea la causa principal. Varios factores están intensificando el ciclo del agua, pero uno de los más importantes es que el calentamiento de las temperaturas eleva el límite superior de la cantidad de humedad en el aire. Eso aumenta la posibilidad de que llueva más. Se espera que la intensidad de las precipitaciones aumente en la mayoría de las zonas terrestres. A nivel mundial, es probable que las precipitaciones extremas diarias se intensifiquen en 7% por cada grado Celsius que aumente la temperatura global (IPPC, 2021).

Las causas de las inundaciones son las precipitaciones y las características físicas de la cuenca y de la llanura de inundación. Las presiones son los factores que inducen e intensifican las crecidas y sus impactos. La caracterización hidrológica del fenómeno depende del tipo de avenida y de la probabilidad con que se presenta. Los impactos son los efectos que sobre el medio ambiente y sobre el medio socioeconómico tienen las crecidas. Las respuestas son las medidas de defensa empleadas para limitar las inundaciones (estructurales) y sus efectos (no estructurales).

Las medidas estructurales consisten en la realización de obras de infraestructura que actúan sobre los mecanismos de formación y propagación de las avenidas. Atendiendo a la función que realizan estas medidas, pueden clasificarse en tres categorías:

- Reducción de caudales punta: presas rompepicos, zonas de almacenamiento controladas, canalizaciones y derivaciones, conservación de suelos y reforestación.
- Reducción de niveles de inundación para un caudal dado: encauzamientos, reducción de remansos procedentes de aguas abajo, corrección, protección y limpieza de cauces.
- Reducción de la duración de la inundación: obras de drenaje pluvial urbano.

En el diseño de las actuaciones estructurales se asume que dichas medidas nunca podrán eliminar totalmente el riesgo, por lo que deberá analizarse cuidadosamente su funcionamiento con caudales superiores al de proyecto, situación para la que se toman en cuenta las medidas no estructurales. Asimismo, las actuaciones estructurales deben considerar, desde el inicio de su diseño, tanto las restricciones ambientales como la posible modificación del esquema de flujo actual, tratando de evitar los posibles efectos negativos a otras zonas.

Marco legal de planeación en México

En la Ley Planeación (Cámara de Diputados, 2018) se establecen las bases de la planeación democrática de los planes, programas y políticas públicas que debe emprender el Gobierno Federal Mexicano. En la *Ley del presupuesto y responsabilidad hacendaria* (Cámara de Diputados, 2022) se establece que un proyecto de inversión son las acciones que implican las erogaciones de gasto de capital, destinadas a obra pública en infraestructura. En el artículo 34 de dicha ley se establece el procedimiento para la programación de los recursos destinados a programas y proyectos de inversión, incluidos aquellos destinados a la mitigación de las inundaciones en zonas urbanas. El procedimiento consiste básicamente de lo siguiente:

- i. Elaborar un mecanismo de planeación de las inversiones, en el cual:
 - a) se identifiquen los programas y proyectos de inversión en proceso de realización, así como aquellos que se consideren susceptibles de realizar en años futuros;

b) se establezcan las necesidades de inversión a corto, mediano y largo plazo, mediante criterios de evaluación que permitan fijar prioridades entre los proyectos.

Los mecanismos de planeación a que hace referencia esta fracción serán normados y evaluados por la SHCP:

- II. Presentar a la SHCP la evaluación de costo y beneficio de los programas y proyectos de inversión que tengan a su cargo, en donde se muestre que dichos programas y proyectos son susceptibles de generar, en cada caso, un beneficio social neto bajo supuestos razonables. La SHCP, podrá solicitar a las dependencias que dicha evaluación esté dictaminada por un experto independiente. La evaluación no se requerirá en el caso del gasto de inversión que se destine a la atención prioritaria e inmediata de desastres naturales;
- III. Registrar cada programa y proyecto de inversión en la cartera que integra la SHCP, para lo cual se deberá presentar la evaluación de costo y beneficio correspondiente. Las dependencias y entidades deberán mantener actualizada la información contenida en la cartera. Sólo los programas y proyectos de inversión registrados en la cartera se podrán incluir en el proyecto de presupuesto de egresos. La SHCP podrá negar o cancelar el registro si un programa o proyecto de inversión no cumple con las disposiciones aplicables;
- IV. Los programas y proyectos registrados en la cartera de inversión serán analizados por la Comisión Intersecretarial de Gasto Financiamiento, la cual determinará la prelación para su inclusión en el proyecto de presupuesto de egresos, así como el orden de su ejecución, para establecer un orden de los programas y proyectos de inversión en su conjunto y maximizar el impacto que puedan tener para incrementar el beneficio social, observando principalmente los criterios siguientes: (a) rentabilidad socioeconómica, (b) reducción de la pobreza extrema, (c) desarrollo regional y (d) concurrencia con otros programas y proyectos de inversión.

Los lineamientos de evaluación de proyectos de inversión (SHCP, 2020) establecen que hay cinco tipos de programas y proyectos de inversión:

- Proyectos de infraestructura económica
- Proyectos de infraestructura social
- Proyectos de infraestructura gubernamental
- Proyectos de inmuebles
- Otros proyectos de inversión

Para cada uno de estos tipos de proyecto se indican los requisitos y requerimientos que deben de cumplir los análisis de costo beneficio.

Beneficios y costos

Se deberá considerar el flujo anual de costos del programa o proyecto de inversión tanto en su etapa de ejecución como en la de operación. Se deberá explicar cómo se identificaron y valoraron los costos, incluyendo los supuestos y fuentes empleadas para su cálculo;

Se tendrá considerar el flujo anual de los beneficios del programa o proyecto de inversión, tanto en su etapa de ejecución como en la de operación. Se deberá explicar de forma detallada cómo se identificaron, cuantificaron y valoraron los beneficios, incluyendo los supuestos y fuentes empleadas para su cálculo.

Los beneficios cuantificables que se obtienen de las obras de mitigación de inundaciones son, entre otros, los que a continuación se indican:

- a) Evitar daños a las viviendas que periódicamente se inundan.
- b) Evitar los daños al menaje de casa de las viviendas que probablemente se inundan.
- c) Evitar los daños a edificaciones comerciales.
- d) Evitar los daños al mobiliario y al equipo de trabajo de los comerciantes.
- e) Evitar las pérdidas de insumos o de mercancías de los comerciantes.

- f) Evitar que los comerciantes dejen de realizar sus actividades temporalmente.
- g) Evitar la interrupción del tránsito vehicular y peatonal.
- h) Evitar el daño al pavimento y las guarniciones y las banquetas.
- i) Evitar daños a los vehículos automotores.
- j) Evitar la minusvalía de los terrenos y las edificaciones que están ubicadas en las zonas inundables y sus inmediaciones.
- k) Evitar la creación de focos infecciosos debido al estancamiento de los escurrimientos pluviales, combinados con aguas residuales, a lo largo de la calle 4° oriente-sur y sus inmediaciones.
- l) Ahorro de recursos económicos y humanos, aplicados a:
 - Reparación de viviendas.
 - Reposición del menaje de casa.
 - Reparación de edificaciones comerciales.
 - Limpieza, recolección, acarreo y disposición final de los materiales.
 - Reposición de insumos y mercancías comerciales.
 - Limpieza, recolección, acarreo y disposición final de los materiales, basuras y desechos que transportan los escurrimientos pluviales y los depositan en las zonas inundables y en las viviendas y edificaciones inundadas.
 - La sanitización de las zonas afectadas por las inundaciones.
 - La atención médica y la aplicación de medicamentos a la población que radica en las zonas inundables en sus inmediaciones.
 - La construcción de obras emergentes para la evacuación de las aguas estancadas y para la protección de la población.
 - La reparación de pavimento, guarniciones y banquetas
 - Reparación de infraestructura de servicios públicos.
- m) Evitar la pérdida de recursos económicos debido a:
 - La inasistencia de la población a sus fuentes de trabajo, derivadas de la necesidad de reparar los daños provocados por las inundaciones.
 - El retraso o inasistencias de la población a su fuente de trabajo por las dificultades para su traslado.
- n) Evitar la suspensión de actividades de los comercios y centros de trabajo.

- o) Evitar las inconformidades, las molestias y los reclamos de la población afectada, directa o indirectamente, por las inundaciones.

En la estimación de los beneficios es necesario considerar que las obras proyectadas están orientadas a reducir o eliminar las inundaciones y encharcamientos generados por las lluvias. Por ello los beneficios del proyecto se componen de los siguientes conceptos:

Ahorros por la reducción en daños en el menaje de viviendas, constituido por el mobiliario y enseres domésticos, así como daños al inmueble de las viviendas afectadas.

Respecto a los beneficios no cuantificados que se identifican, cabe hacer mención de que por su naturaleza son difíciles de valorar.

Destacan los ahorros en gastos incurridos en los establecimientos comerciales, industriales y de servicios afectados por las inundaciones, por daños a mercancías, equipo, mobiliario y activos, así como en la actividad productiva suspendida y las afectaciones a la salud pública que es posible evitar.

Adicionalmente se evitarán problemas viales en las zonas inundadas al evitar congestionamientos y reducir el tiempo de traslado de automovilistas y transporte público, así como descomposturas y accidentes. También se busca evitar la disminución del crecimiento económico de la zona urbana al propiciar condiciones menos riesgosas para el establecimiento de industrias.

Para cuantificar los beneficios correspondientes al evitar los daños económicos en viviendas, se partió de las estimaciones de áreas inundables para diferentes periodos de retorno, en las situaciones sin y con proyecto, que se reseñaron en los respectivos apartados. En caso de la situación con proyecto, el diseño de las obras se realizó para el gasto con periodo de retorno de *cient años*, por lo que se considera que se evitarán totalmente los daños en las viviendas.

A partir de dichas superficies inundables para cada periodo de retorno, sin y con proyecto, superponiéndolas con los mapas de ubicación de viviendas y sus respectivos datos, obtenidos en recorridos e investigaciones de campo, se calculó por cuenca el número de viviendas afectadas según tirante de inundación, para diferentes periodos de retorno, en situación sin y con proyecto.

Es oportuno señalar que este cálculo de viviendas inundables, además de realizarse por cuenca, también se determinó de acuerdo con el índice de marginación urbana definido por el Consejo Nacional de Población (Conapo) para 2010.

Ahora bien, para estimar el valor de los daños en cada vivienda inundada, se utilizaron las funciones sintéticas detalladas en el cuadro, que relacionan, según el índice de marginación urbana (IMU), los daños que se presentan en los contenidos de las viviendas en función de la profundidad de la inundación:

Las funciones y la metodología están establecidas en Solís, Lafragua y García (2014). Se presentan los valores determinados para daños en vivienda por nivel de inundación, considerando el grado de marginalidad de acuerdo con los registros y estadísticas del INEGI, a fin de aplicar al efecto las funciones sintéticas consideradas como más probables del cuadro anterior. Es importante mencionar que se consideró que sólo las viviendas que presentan tirantes de inundación mayor a 0.2 m son afectadas.

La determinación de las zonas de inundación deberá realizarse con un programa de simulación hidráulica reconocido por la Conagua. Para la modelación hidráulica de las obras propuestas se empleó el Programa SWMM®, del inglés *Storm Water Management Model* (Modelo de Administración de Aguas Pluviales), creado por la Environmental Protection Agency, del Gobierno de los Estados Unidos, en su versión 5.1.012, del 30 de marzo de 2017.

El motor hidrodinámico de este programa se basa en la solución de las ecuaciones de Saint Venant por medio de un esquema implícito de primer orden (linealización de ecuaciones hiperbólicas diferenciales) de cuatro puntos, denominado esquema de Preissmann, el cual tiene como característica principal el cálculo en todo punto del dominio de integración de las variables gasto y tirante; es decir que para un mismo punto de discretización, dentro del dominio de integración del sistema de ecuaciones de Saint Venant, se estiman simultáneamente el tirante y el gasto.

La simulación deberá de realizarse para las condiciones con proyecto y sin proyecto y para diferentes periodos de retorno; 2 años = 3.37 m³/s; 5 años = 8.04 m³/s; 10 años = 11.62 m³/s; 20 años 14.86 m³/s; 50 años 18.74 m³/s; 100 años 22.10 m³/s.

Se deben aplicar las mencionadas funciones de daños al número de viviendas inundadas:

- con y sin proyecto,
- por cuenca,
- por cada nivel de inundación,
- por cada periodo de retorno,
- para cada IMU.

Posteriormente hay que calcular el valor actual neto (VAN) del proyecto, descontando todos los costes (C) y beneficios (B) futuros (expresados a precios constantes) mediante la utilización de una tasa social de descuento (r) y la expresión (1):

$$\text{VAN} = \frac{-I_0 + \sum_{t=1}^n (B_t - C_t + BI_t - CI_t \pm e)}{(1 + d)^t} \quad (1)$$

Donde:

I = Inversión

B_t = Beneficios Directos

BI_t = Beneficios indirectos

C_t = Costos directos

CI_t = Costos indirectos

e = Externalidades

d = Tasa social de descuento

t = periodo (año)

La tasa social de descuento refleja la preferencia social por los beneficios y costes en la actualidad frente a los beneficios y costes futuros y, en general, no coincide con la tasa de descuento privada. La cuestión de la selección de la apropiada tasa social de descuento en la evaluación de proyectos ha sido objeto de una gran controversia. En México, la tasa social de descuento aplicable es de 10%.

Se considera entonces que el proyecto es socialmente deseable si el VAN calculado es positivo. Este criterio también es adecuado para elegir entre proyectos alternativos, mutuamente excluyentes. Sin embargo, cuando va-

rios proyectos obtienen un VAN positivo y no son mutuamente excluyentes (es decir, es posible implementar más de uno), la relación costo-beneficio (RCB) establece un criterio de decisión que complementa el VAN y permite jerarquizar los proyectos.

Caso: Tuxtla Gutiérrez, Chiapas

La ciudad de Tuxtla Gutiérrez está asentada dentro de la cuenca del río Sabinal, el cual es formador del río Grijalva y se ubica dentro de la región hidrológico-administrativa número XI (frontera sur) y dentro de la región hidrológica número 30, Grijalva-Usumacinta. El cambio del uso del suelo propiciado por el acelerado crecimiento de la mancha urbana de la ciudad ha traído como consecuencia la reducción de la superficie para la infiltración del agua, la reducción de tiempo de concentración de los escurrimientos pluviales a lo largo de su recorrido por la vialidad y el incremento de la lluvia efectiva.

En el pasado reciente, tormentas de mediana intensidad han producido inundaciones simultáneas en más de un centenar de zonas urbanas dentro de la ciudad. Los daños más severos a la población y a su patrimonio, incluyendo lamentablemente la muerte de varias personas, ocurren en la cuenca media y baja del Arroyo Terán, en la cuenca media del Arroyo Cocal I, en la cuenca media y baja del Arroyo Cocal II; la cuenca media y baja del Arroyo kilómetro 4 y en la cuenca media y baja del Arroyo 24 de junio.

El crecimiento urbano de la ciudad de Tuxtla Gutiérrez ha sido espontáneo, desordenado y acelerado. La gran mayoría de los cauces y los márgenes de los arroyos que cruzan la ciudad de Tuxtla Gutiérrez han sido invadidos con edificaciones y vialidades.

Para resolver los problemas provocados por las inundaciones en las zonas en donde han sucedido los daños más severos a la población, se propone la construcción de las obras que se indican a continuación:

- Cuenca media y baja del arroyo Terán: interceptor pluvial de alivio para conducir los escurrimientos pluviales hasta el Río Sabinal.

- Cuenca media del arroyo Cocal I: interceptor pluvial de alivio para conducir los escurrimientos pluviales hasta el río Sabinal.
- Cuenca media y baja del arroyo Cocal II: interceptor pluvial de alivio para conducir los escurrimientos pluviales hasta el río Sabinal.
- Cuenca media y baja del arroyo kilómetro 4: interceptor pluvial de alejamiento para trasvasar los escurrimientos pluviales hasta el cauce canalizado del arroyo Infonavit-El Rosario; esto incluye mejoramiento y rehabilitación del cauce canalizado del arroyo Infonavit-El Rosario.
- Cuenca media y baja del arroyo 24 de junio: canalización del cauce de la cuenca media del arroyo; interceptor pluvial de alivio para conducir los escurrimientos pluviales hasta el canal del parque del Oriente; mejoramiento y rehabilitación del cauce del canal del parque del Oriente.

Se consideró que la ejecución del proyecto podría realizarse en un plazo de un año. Se iniciara en 2022 con las actividades preparatorias para su ejecución, podría concluirse en ese mismo año. El programa de trabajo previsto se muestra a continuación, con las principales actividades previas a la ejecución de las obras consideradas. Cabe señalar que ya se cuenta con los proyectos ejecutivos de ingeniería de los trabajos por realizar, de tal manera que la ejecución de las obras podría iniciarse sin dilación. La puesta en operación de las acciones realizadas se iniciaría en 2023.

Respecto a la vida útil de las obras que comprende el presente documento, considerando las acciones por realizar y el tipo de material que se utilizará en las obras que las componen, se estima que la vida útil de éstas alcanza entre 30 y 50 años. Para efectos de su análisis, y en el caso del horizonte de evaluación, se ha considerado un periodo de 30 años de operación.

El costo total privado del proyecto de inversión se calcula en \$349 750 000 más IVA, a precios de 2021. El monto total de la inversión es de \$405 710 248.24, incluido IVA a precios de 2021. En la tabla 1 se resumen los indicadores de evaluación obtenidos para cada una de las cuencas en estudio.

Tabla 1. *Indicadores de evaluación de las inversiones por realizar en la ciudad de Tuxtla Gutiérrez, Chiapas*

<i>Cuenca</i>	<i>Valor presente neto (VPN \$)</i>	<i>Tasa interna de retorno</i>	<i>Tasa de rentabilidad inmediata</i>
Arroyo Terán	102 126 917.98	39.53%	39.53%
Arroyo Cocal I	416 379 599.90	54.46%	54.46%
Arroyo Cocal II	189 246 568.85	44.12%	44.12%
Arroyo kilómetro 4	199 620 488.88	45.72%	45.72%
Arroyo 24 de Junio	305 326 417.23	46.06%	46.06%
Global	1 212 699 992.82	47.39%	47.39%

Fuente: Elaboración propia.

El cálculo del valor esperado anual de los daños sirvió de base para establecer la corriente anual de beneficios esperados del proyecto, en la que se consideró que al siguiente año de concluidas las obras se presentarían los primeros beneficios. Esta hipótesis de considerar los beneficios sólo hasta el siguiente año de concluidas las obras para cada cuenca es conservadora, en el sentido de que no se atribuyen beneficios que seguramente se lograrán por las inversiones de los años precedentes.

A continuación, en la tabla 2, se presenta el resumen del análisis de riesgo para las obras propuestas.

En conclusión, los proyectos tienen una alta rentabilidad social, aun y cuando no se pueden internalizar todos los beneficios. Como resultado de la elaboración del proyecto, este fue incluido en la cartera de proyectos que la SHCP presenta a la Cámara de Diputados, para la elaboración del presupuesto de egresos. Una vez en cartera, permanece tres años en ella, y durante ese periodo puede ser considerado para su instrumentación.

Tabla 2. *Análisis de riesgo del proyecto de inversión para la construcción de las obras para la captación, la conducción y la evacuación de los escurrimientos pluviales que inundan las zonas urbanas de los cauces; bajas de los arroyos Terán, Cocal I, Cocal II, Kilómetro 4 y 24 de junio, en la Ciudad de Tuxtla Gutiérrez, Chiapas*

<i>Riesgo</i>	<i>Impactos</i>	<i>Probabilidad</i>
Incrementos significativos en el costo de inversión de las obras	Insuficiencia presupuestaria y retraso en la ejecución del proyecto Baja en la rentabilidad del proyecto, hasta llegar a valores negativos	<i>Baja</i> Los costos estimados se apoyan en la realización de los estudios de factibilidad y en los proyectos ejecutivos de las obras. Se considera que existe un nivel alto de confiabilidad en los costos Adicionalmente los análisis de sensibilidad muestran que se tendrían que incrementar los costos de inversión hasta 270%, lo que se considera muy improbable, para alcanzar la rentabilidad mínima aceptable
Que el nivel en que se mitigan inundaciones sea considerablemente menor al planteado	Reducción en los daños evitados Baja en la rentabilidad del proyecto	<i>Baja</i> Los análisis técnicos realizados permiten tener un adecuado nivel de confianza sobre los daños que se logrará evitar con su ejecución Los análisis de sensibilidad sobre la posible disminución de los beneficios indican que tendrían que bajar 50% para llegar a 10% de rentabilidad
Oposición a la ejecución del proyecto por grupos de la sociedad	Que las obras se retrasen o sufran modificaciones importantes	<i>Baja</i> Existe una clara percepción de la sociedad de la ciudad de Tuxtla Gutiérrez de los problemas generados por las deficiencias del drenaje pluvial, por lo que no se considera que éste sea un riesgo importante
Oposición para la obtención de facilidades para la utilización de terrenos de uso público y privado	Que las obras se retrasen o sufran modificaciones importantes	<i>Baja</i> La obra transcurrirá por la vialidad, por lo que no se utilizarán terrenos privados

Fuente: Elaboración propia.

Bibliografía

- Ayuntamiento Municipal de Tuxtla Gutiérrez, Chiapas. (2019). *Plan Municipal de Desarrollo 2018-2021*. Disponible en: <https://tuxtla.gob.mx/pgmuniarchivosPlan-Municipal-de-Desarrollo-2018-2021.pdf>
- Comisión Nacional del Agua (Conagua). (s. f.). *Manual de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento -Metodologías de evaluación socioeconómica y Estructuración de proyectos de inversión*
- . (s. f.). *Manual de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento -Drenaje pluvial urbano*
- Congreso de la Unión. (2015). *Ley General de Equilibrio Ecológico y Protección al Ambiente*. Disponible en: <http://biblioteca.semarnat.gob.mx/janium/Documentos/Ciga/agendaDOFsr148.pdf>

- . (2016). *Ley de Aguas Nacionales*, última reforma vigente 24 marzo 2016. Disponible en: http://www.diputados.gob.mx/LeyesBibliopdf16_240316.pdf
- . (2018). *Ley General de Protección Civil*, Disponible en: http://www.diputados.gob.mx/LeyesBibliopdfLGPC_190118.pdf
- . (2019). *Ley General de Asentamientos Humanos*, ordenamiento territorial y desarrollo urbano, última reforma vigente 14 mayo 2019. Disponible en: http://www.diputados.gob.mx/LeyesBibliopdfLGAHOTDU_140519.pdf
- . (2018). *Ley General de Protección Civil*, Disponible en: http://www.diputados.gob.mx/LeyesBibliopdfLGPC_190118.pdf
- Congreso del Estado de Chiapas. (2019). *Ley de Planeación para el Estado de Chiapas*, Disponible en: <https://www.haciendachiapas.gob.mx/marco-juridico/Estatalinformacion/Leyesplaneacion.pdf>
- Consejo Nacional de Evaluación de la Política de Desarrollo Social (CONEVAL). (s. f.). *Medición de la pobreza 2010-2016*, Disponible en: https://www.coneval.org.mx/MedicionMPPaginasPobreza_2016.aspx
- Consejo Nacional de Población. (2010). Índice de marginación por entidad federativa y municipio 2010, Disponible en: http://www.conapo.gob.mx/es/Conapo/Indices_de_Marginacion_2010_por_entidad_federativa_y_municipio
- Gobierno del Estado de Chiapas. (2019). *Plan Estatal de Desarrollo 2019-2024* Disponible en: <http://www.haciendachiapas.gob.mx/planeacion/InformacionPEDPED-2019.pdf>
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía. (2019). Censos y Conteos de Población y Vivienda. <https://www.inegi.org.mx/datos/?ps=Programas>
- . (2019a). Prontuario de información geográfica municipal de Tuxtla Gutiérrez. Disponible en: http://www3.inegi.org.mx/contenidos/app/mexicocifras/datos_geograficos/0707101.pdf
- Panel Intergubernamental de Cambio Climático. (2021). *Summary for Policymakers. In: Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S.L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M.I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T.K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu, and B. Zhou (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, pp. 3-32, doi:10.1017/9781009157896.001.
- Secretaría de Hacienda y Crédito Público. (2020). *Lineamientos para la elaboración y presentación de los análisis costo y beneficio de los programas y proyectos de inversión*.
- Singh, Vijay Editor. (2017). *Handbook of Applied Hydrology*. Segunda Edición. EUA
- Secretaría de Protección Civil del Estado de Chiapas. (2011). *Mapa de riesgos hidrometeorológicos de la zona metropolitana de Tuxtla Gutiérrez*. Disponible en: https://www.proteccioncivil.tuxtla.gob.mx/pgpcivil/archivosAtlas_de_riesgos_TGZ.pdf
- Solís Alvarado, Yolanda et al. (2014). *Estimación de daños económicos en zonas urbanas inundables, con base en el Área Geoestadística Básica para obtención del Daño Anual Esperado*, Informe Final, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. Disponible en: <http://repositorio.imta.mx/bitstream/handle/20.500.120131027/TH-1402.1.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

III. Análisis de la situación ambiental de las presas El Cajón y Las Rucias, con énfasis faunístico

AGUSTÍN CAMACHO RODRÍGUEZ*

CARLOS VLADIMIR MURO MEDINA**

EDITH XIO MARA GARCÍA***

EDUARDO JUÁREZ CARRILLO****

DOI: <https://doi.org/10.52501/cc.178.03>

Resumen

El Centro Universitario de Tonalá (CUTonalá) es parte de un humedal cuyo componente hídrico está conformado por las presas de El Cajón y Las Rucias. Este ecosistema se caracteriza por la presencia de una vegetación hidrófila acompañada de una gran diversidad microbiológica y animal. El registro y monitoreo de la fauna es sólo una parte de las actividades que realiza el CUTonalá, por medio del Instituto de Energías Renovables, para los programas de conservación y sustentabilidad. De acuerdo con el estudio de manifestación de impacto ambiental de modalidad particular (MIA-P) y con el catálogo faunístico que ha realizado el Instituto de Energías Renovables, la fauna del centro universitario está representada (de mayor a menor número de especies registradas) por aves, mamíferos, peces, reptiles y anfibios. Algunas de estas especies se encuentran en alguna categoría de protección con base en la NOM-059-Semarnat-2010. En suma, los parámetros fisicoquímicos de calidad del agua de la presa El Cajón y el número de especies

* Licenciado Biólogo Pesquero. Departamento de Estudios del Agua y de la Energía, Centro Universitario de Tonalá, Universidad de Guadalajara, México.

** Doctor en Ciencias en Innovación Biotecnológica. Departamento de Estudios del Agua y de la Energía, Centro Universitario de Tonalá, Universidad de Guadalajara, México. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2626-7179>

*** Doctora en Geología. Departamento de Estudios del Agua y de la Energía, Centro Universitario de Tonalá, Universidad de Guadalajara, México. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7655-8014>

**** Biólogo. Instituto de Limnología, Universidad de Guadalajara, Chapala, Ajijic, México.

registradas indican que el estado ambiental del humedal es aceptable, a pesar de las constantes perturbaciones a las que es sometido; por ello es necesario tomar medidas para su protección y conservación.

Palabras clave: *Sustentabilidad, conservación, humedales, fauna, aves, CUTonalá.*

Introducción

El CUTonalá, en el marco del desarrollo institucional de la Universidad de Guadalajara 2014-2030, ha establecido pautas para consolidarse como un centro universitario sustentable, social y ambientalmente responsable en donde la comunidad universitaria se compromete y contribuye para alcanzar los objetivos trazados hacia el 2030. Frente al desarrollo tradicional, la sustentabilidad se presenta como una alternativa viable en nuestro espacio universitario, ya que debido a la multidisciplinariedad de sus programas de estudio se pueden conjugar aspectos teóricos y prácticos para la implementación de un modelo de economía sustentable mediante proyectos de investigación cooperativos enfocados en solucionar problemas ambientales y empresariales, con el uso de tecnologías limpias y modelos de gobernanza justos y eficientes.

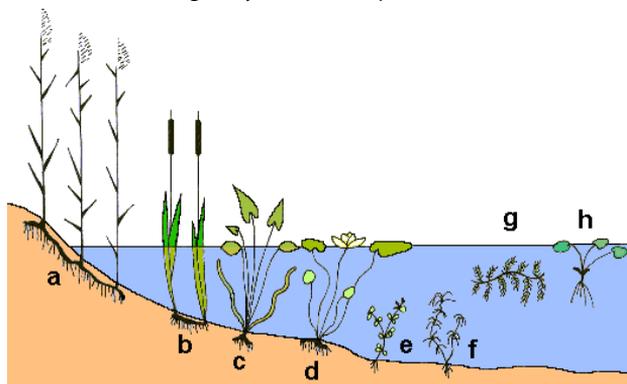
En adición a lo anterior, el contexto geográfico del CUTonalá privilegia el desarrollo de programas sustentables, ya que, además de tener una comunidad universitaria vibrante y el apoyo institucional de la Universidad de Guadalajara, de gobiernos municipales, estatales y federales, así como del sector privado y de la sociedad civil en general, cuenta con amplias áreas con presencia de humedales. Creemos que los programas sociales e institucionales que pretendan contribuir con el desarrollo sustentable de las comunidades deben considerar el estudio y análisis de la diversidad biológica presente en sus alrededores, junto con el análisis de parámetros abióticos, como la temperatura y la humedad, así como la calidad del aire, del suelo y del agua. De dichos análisis se puede obtener un panorama más preciso de la situación ambiental del entorno y, con dicha información, tomar decisiones informadas y consensuadas.

Es así que el CUTonalá ha implementado el Programa Integral de Sustentabilidad Ambiental del Centro Universitario de Tonalá (Pisacut) utilizando como principal herramienta un modelo de educación ambiental en sus seis líneas estratégicas: (a) manejo de residuos sólidos, (b) uso eficiente de agua, (c) gestión de energía, (d) conservación de la biodiversidad, (e) calidad del aire y (f) movilidad y transporte sostenible. Aquí se muestran datos del catálogo faunístico de vertebrados registrados en los humedales y la calidad del agua de la presa El Cajón.

Antecedentes

Un humedal es un ecosistema que se caracteriza por presentar un área cubierta de agua dulce, salobre o salada, ya sea formando pantano, marisma o turbera. Puede estar presente de forma natural o artificial, ser permanente o temporal y estancado o con corriente, con una profundidad no mayor a seis metros (Pacheco *et al.*, 2020). En los humedales existe un componente vegetal compuesto principalmente de plantas hidrófitas, especies que pueden estar adaptadas para sobrevivir únicamente en el agua o especies que pueden ser facultativas y adaptarse a las variaciones de los niveles que alcanza el agua en las diferentes épocas del año (figura 1).

Figura 1. Morfología de plantas hidrófilas: (a) y (b): anfibias o palustres, (c) y (d): arraigadas con hojas flotantes, (e) y (f): plantas arraigadas totalmente sumergidas, (g) y (h): plantas libres sumergidas y flotantes respectivamente



Además de plantas hidrófilas, también hay plantas higrófilas con gran capacidad de tolerar grandes variaciones y cantidades de humedad. En suma, el estrato vegetal de los humedales los convierte en ecosistemas (*a*) que sirven de hábitat y brindan refugio para una gran variedad de fauna de peces, anfibios, aves acuáticas y terrestres; (*b*) en los cuales se generan productos que sirven como materia prima para construcción, recursos alimenticios, medicinales y ornamentales, todos éstos resultado de los procesos químicos y biológicos de los humedales; (*c*) cuya belleza escénica y el aporte recreativo y educacional son funciones culturales de los humedales; y (*d*) que regulan procesos ecológicos esenciales para la vida, como los ciclos hidrológicos y de carbono (Hernández, 2010; Marín, Hernández y Moreno, 2011). Esta gran diversidad de especies, de productos y de servicios que ofrecen los humedales se ha visto amenazada debido a que está sometida a una gran presión por parte del hombre ya que no se le ha dado el valor real en cuanto al potencial de beneficios que estos ecosistemas proporcionan a la comunidad a corto, mediano y largo plazo. En los modelos de desarrollo tradicionales sólo se ve el usufructo inmediato en el uso de la tierra y no del ecosistema en sí.

Los efectos de la actividad humana irracional sobre los cuerpos lacustres implican siempre un resultado negativo, ya que ésta altera los procesos que se llevan a cabo en el ecosistema al trastocarse el equilibrio de las interacciones entre organismos, la tierra y el agua, ya sea alterando la cobertura vegetal y la topografía adyacente al vaso para procesos agrícolas, ya sea por la deposición de fertilizantes, plaguicidas, metales pesados, detergentes, solventes orgánicos, recipientes de plástico, etcétera, que terminan alterando la fauna y la vegetación de los cuerpos de agua, al grado de acelerar así el proceso natural de senescencia, por la extracción inmoderada de agua para usos agrícolas, industriales y urbanos y el vertimiento de aguas residuales sin el adecuado tratamiento (Campo y Escobar, 2021; Núñez *et al.*, 2022). Todo abona al deterioro ambiental de los cuerpos lacustres.

En el CUTonalá, el área de humedales corresponde a los dos cuerpos de agua adyacentes: la presa El Cajón y la presa La Rucias. La primera corresponde a un cuerpo de agua de aproximadamente 15 hectáreas y está conectada con la presa Las Rucias; ambas constituyen un único humedal. La superficie del humedal y la del centro universitario considera unas 69.48 ha. De estos dos cuerpos de agua, sólo la presa El Cajón muestra un espejo de agua

permanente con volúmenes importantes, mientras que Las Rucias no; ello debido a los procesos de azolvamiento muy importantes provocados principalmente por la invasión urbana en la periferia de Las Rucias, con la consecuente proliferación de flora acuática y semiacuática. Con la construcción del nuevo Hospital Civil de Oriente se ha impactado de manera similar en la presa El Cajón, aunque sigue conteniendo un volumen de agua importante.

Debido a lo interior, los análisis de agua se han conducido en la presa El Cajón. Geográficamente esta presa se ubica al sur del municipio de Tonalá, en sus límites con el municipio de El Salto. El punto central corresponde a las coordenadas: 200° 33' 42.6" latitud Norte y 103° 13' 40.06" longitud Oeste. En la ficha técnica hidrológica del Municipio de Tonalá, elaborada por la Comisión Estatal del Agua del Estado de Jalisco en 2015, se consignan sólo cuatro cuerpos de agua con un volumen mayor a 0.5 millones de metros cúbicos (Mm³); éstas son la presa Colimilla (Los Monos), Las Juntas, Derivadora Puente Grande y Luis M. Rojas (Intermedia), con capacidad de almacenamiento de 2.85, 1.5, 1.5 y 0.9 Mm³ respectivamente. El Cajón no aparece en esa ficha técnica, de tal forma que los estudios de calidad del agua realizados por el CUTONALÁ son los únicos efectuados.

Respecto a la riqueza biológica de estos humedales adyacentes al centro, ésta ya ha sido evaluada por el estudio de MIA-B, requerido para el desarrollo del proyecto "Puente de Acceso y Edificio de Agua y Energía del Centro Universitario de Tonalá". Como resultado se reportó que en las inmediaciones del centro universitario la fauna de vertebrados comprende una comunidad de peces conformada por diez especies. De todas las especies de peces presentes en el área de estudio, sólo dos aparecen en la NOM-059-Semarnat-2010: "Protección ambiental-especies nativas de México de flora y fauna silvestres-categorías de riesgo y especificaciones para su inclusión, exclusión o cambio". Esas dos especies son *Allotoca dugesi* (Bean, 1887), considerada especie amenazada (A) y de distribución endémica, y *Poecilia butleri* (Jordan, 1889), especie bajo protección especial (Pr) y no endémica. Respecto a la herpetofauna presente, se registraron seis especies en total: dos especies de anfibios y cuatro de reptiles. Las especies de anfibios registradas representan dos géneros de dos familias dentro de un mismo orden, las cuales no se encuentran bajo alguna categoría de protección y ninguna es endémica

de México. En cuanto a las especies de reptiles, éstos se agrupan en cuatro géneros de cuatro familias repartidas en dos órdenes. De estas, dos especies de reptiles se encuentran protegidas bajo alguna categoría de la NOM-059-Semarnat-2010. Además, las cuatro especies de reptiles registradas son endémicas de México. El grupo de vertebrados más abundantes es el de las aves, con 43 especies registradas por el MIA-P. Dos de ellas ostentan alguna categoría de riesgo dentro de la norma ya citada. Los mamíferos están representados por un total de quince especies; estas corresponden a catorce géneros, nueve familias y seis órdenes. Ninguna de ellas es endémica y tampoco se encuentran incluidas con alguna categoría de riesgo en la norma oficial antes citada.

Actividades de campo

Para el monitoreo de la calidad del agua se siguieron los lineamientos convenidos entre el Instituto de Limnología del Centro Universitario de Ciencias Biológicas y Agropecuarias (CUCBA) y el Instituto de Energías Renovables del CUTONALÁ. Se programaron salidas bimestrales en los años 2020, 2021 y 2022, en lancha, para medir transparencia con un disco de Secchi y los parámetros de profundidad, temperatura, conductividad, pH, oxígeno disuelto y potencial e óxido-reducción (redox) con una sonda. Se tomaron datos de dos puntos de muestreo (figura 2).

Para el monitoreo de fauna se realizó un estudio de tipo descriptivo, en el que la metodología específica para la observación, registro, sistematización y categorización de la fauna ha sido ya establecida en la literatura especializada para cada taxa en estudio (Peterson y Chalif, 1989; Espinosa, Fuentes y Gaspar-Dillanes, 1993; Flores-Villela, 1993; Spinola, 2004; Miller, Minkley y Norris, 2005; Born-Schmidt, Servole y Koleff, 2017). Se consideró como especies presentes en el área de estudio a todas aquellas que ocurrieron al menos con un registro. Para el caso de las aves migratorias se anotó su presencia aunque hayan sido observadas como de ave de paso. Ninguno de los individuos fue sacrificado, salvo para aquellas especies cuya identificación en campo se tornó difícil (en cuyo caso se conservó en alcohol a un número de individuos suficiente para su identificación en laboratorio).

Como parte del proceso de toma de conciencia por parte de la comunidad universitaria y de todos los participantes en este proyecto, particularmente ayudantes y prestadores de servicio social, se creó un área para el resguardo de los animales capturados. Las visitas y salidas al campo se programaron bimestralmente, procurando en todo caso cubrir la totalidad de los picos de máxima actividad diaria y estacional para cada uno de los grupos zoológicos en estudio (figura 2).

Figura 2. (a) Presa El Cajón con vista al humedal y al fondo el impacto por el relleno para la construcción del nuevo Hospital Civil de Oriente; (b) personal del Instituto de Limnología del CUCBA, realizando muestreos; (c) presa Las Rucias; (d) presencia de especies endémicas y nativas; tortuga casquito; (e) estudiantes de servicio social participando en el monitoreo de fauna



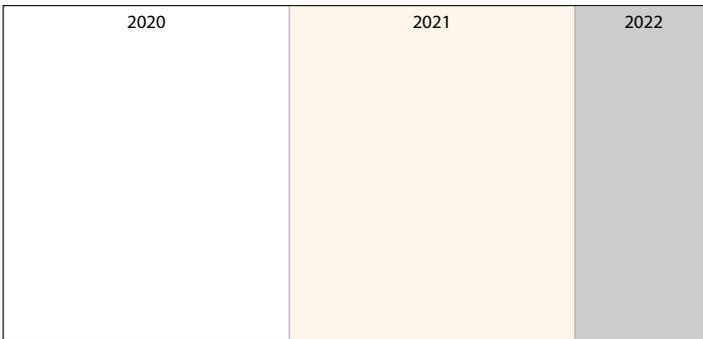
Fuente: Elaboración propia.

Resultados

Parámetros abióticos de la presa El Cajón

Se muestran datos de catorce campañas de monitoreo realizadas entre los años 2020 y 2022. La profundidad del agua en la presa El Cajón presenta un promedio de 134.3 cm para el sitio 1 y 139.6 cm para el sitio 2. En este parámetro se observa un patrón de variación importante: en junio de 2020 y de 2021 los niveles de la superficie del agua alcanzaron el mínimo en ambos sitios, lo cual coincide con el fin del verano antes de la temporada de lluvias (figura 3). Los niveles máximos, en este mismo periodo de tiempo, varían entre el año 2020 y el año 2021. En el año 2020, el nivel de profundidad máximo fue, en promedio, de 170 cm durante el mes de agosto, mientras que en el 2022 el nivel de profundidad máximo promedio fue de 282.5 cm durante el mes de octubre. La tendencia que muestra la gráfica indica que los volúmenes de agua disminuyen lentamente después de los puntos máximos, pero se incrementaron rápidamente por la temporada de lluvias del año entrante, como se observa a partir de agosto en el 2020 hasta el periodo de llenado del embalse, en el año 2021, el cual se prolongó hasta el mes de octubre. Los niveles mínimos observados para el mes de junio del año 2022 son similares a los niveles máximos observados de 2020 (figura 3).

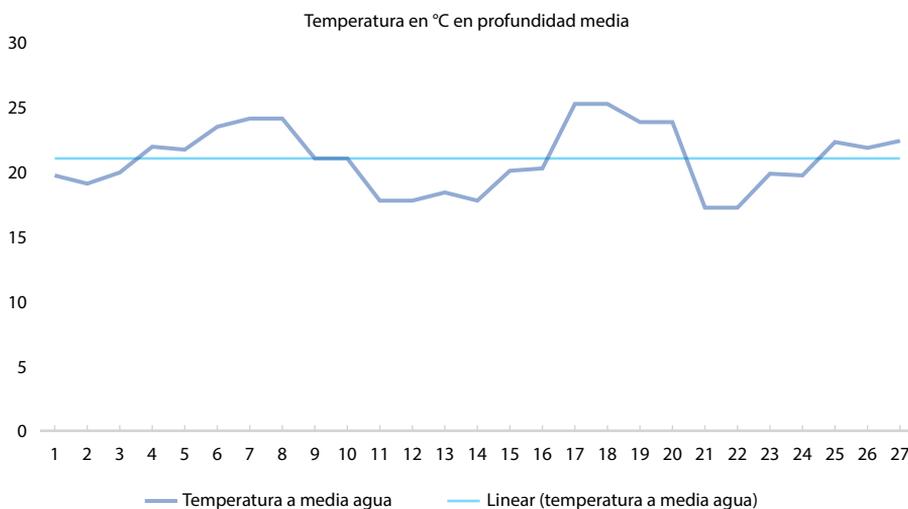
Figura 3. Profundidad de la presa El Cajón durante los años 2020, 2021 y 2022



Fuente: Elaboración propia.

La temperatura del espejo de agua se midió en la superficie, a media agua y en el fondo, sin importar la profundidad. Puesto que la diferencia en estos valores y en relación con el sitio no mostro variación importante, sólo se analiza la variación a media agua y sin importar el sitio. En la figura 4 se muestra este comportamiento cronológicamente. Los valores a la izquierda del gráfico corresponden a las fechas iniciales del estudio y las de la derecha a las del final del mismo. Se aprecia claramente que la temperatura se comporta tal y como se esperaría, con valores máximos de 24 °C en el año 2020 y 25.4 °C en 2021. Los valores mínimos fueron de 17.7 °C en 2020 y de 17.2 °C en 2021. El valor promedio global fue de 21 °C.

Figura 4. Temperatura de la presa El Cajón entre marzo del 2020 hasta junio del 2022. La línea recta representa la temperatura media



Fuente: Elaboración propia.

En adición a la profundidad y la temperatura, se obtuvo la cantidad de oxígeno disuelto en partes por millón (ppm). Este parámetro ambiental es de alta relevancia para la fauna presente, ya que es crítico para su presencia y permanencia. El valor promedio del oxígeno disuelto en la presa El Cajón es de 3.73 ppm. Haciendo énfasis en peces, los valores óptimos van desde los 2.7 ppm (miligramos por litro de agua) hasta las 5 ppm. Valores un poco mayores no causan daños. Carrillo López, *et al.* (2013) señalan que, cuando

el oxígeno disuelto en el agua está disponible en concentraciones suficientes como para mantener los ecosistemas en buenas condiciones, los organismos aeróbicos lo usarán y producirán sustancias inocuas para los ecosistemas acuáticos. Cuando el oxígeno es consumido en su totalidad o se encuentra en bajas concentraciones, los organismos anaeróbicos proliferarán y generarán sustancias perjudiciales para otros organismos y para el ecosistema en general. El agotamiento del oxígeno en el agua puede ocurrir naturalmente. Las plantas lo consumen en ausencia de luz (no hay fotosíntesis y, por lo tanto, no producen oxígeno) y los animales acuáticos lo hacen en el proceso de respiración. Asimismo, en las capas profundas de lagunas, lagos e incluso de ríos, el oxígeno que ingresa desde la atmósfera y el producido durante la fotosíntesis no alcanzan a llegar o se consumen rápidamente en las capas más superficiales.

Los valores registrados de oxígeno disuelto para los dos sitios de muestreo aparecen en la tabla 1. Si bien no manifestaron valores óptimos para los peces presentes, sus valores nunca fueron críticos. Los valores de potencial redox muestran niveles muy bajos (positivos), lo que indica poca capacidad de oxidación, esto es, existen muchos elementos que captan electrones y que, por lo tanto, reducen su estado de oxidación. En cuanto a los valores de pH, éstos no muestran grandes variaciones. Se trata de un parámetro ambiental muy estable para las aguas muestreadas, las cuales concuerdan con lo esperado para este tipo de aguas, ligeramente alcalinas (tabla 1).

Tabla 1. Promedio y desviación estándar de oxígeno disuelto, pH y potencial redox de los dos sitios de muestreo y obtenidos de la superficie, de la profundidad media y del fondo

Oxígeno disuelto (ppm)	pH	Redox
3.0 (± 1.2)	7.5 (± 0.3)	0.321 (± 0.05)

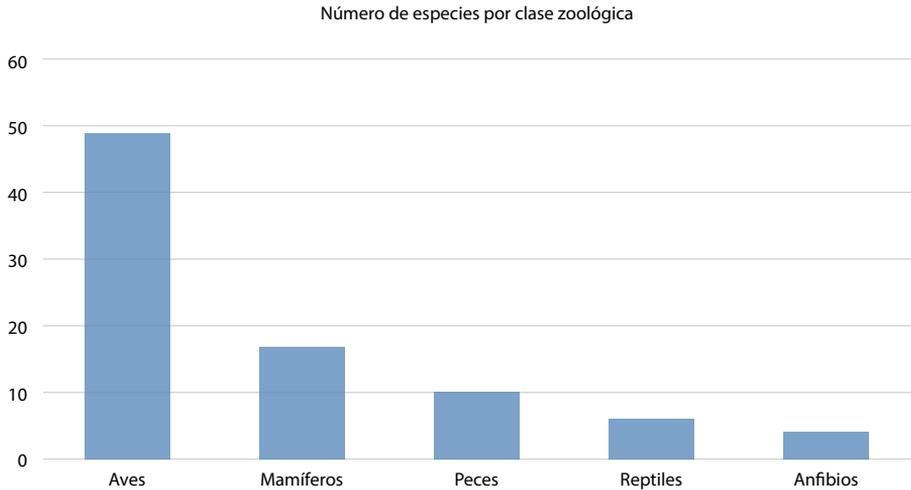
Fuente: Elaboración propia.

Informe faunístico

El CUTonalá ha mostrado ser un centro universitario con una amplia variedad de fauna vertebrada. Como ya lo había mostrado el estudio MIA-P, los resultados obtenidos por el programa de registro y monitoreo de fauna

muestran que el grupo más abundante en número de especies son las aves, seguidas de mamíferos, peces, réptiles y anfibios (figura 5).

Figura 5. Los grupos zoológicos más abundantes en número de especies



Fuente: Elaboración propia.

La fauna presente en CUTonalá está representada por ocho especies de peces: *Chirotostoma chapalae*, *Allotoca dugesi*, *Chapalichthys encaustus*, *Goo-dea atripinnis*, *Poecilia butleri*, *Poeciliopsis infans*, *Lepomis gulossus* y *Oreochromis aureus* (figura 6).

De estas especies, dos aparecen en la NOM-059-Semarnat-2010 como especie amenazada (*A*): *Allotoca dugesi* (Bean, 1887), y de distribución endémica y bajo protección especial (*Pr*) tenemos a *Poecilia butleri* (Jordan, 1880), que es no endémica.

La herpetofauna encontrada consta de la culebra de agua nómada, *Thamnophis eques*, y la tortuga pecho quebrado, *Kinosternon integrum*, que se reconocen como especies protegidas bajo alguna categoría de la norma anterior. Otras especies de reptiles registradas son *Sceloporus torcuatus*, *Anolis nebulosus*, *Masticophis mentovarius* y *Oxibelis aeneus*. Entre los anfibios se encontró a *Lithobates catesbeiana*, *L. montezumae*, *Hyla eximia* e *Hypopachus variolosus* (figura 7).

Figura 6. Peces presentes en la presa El Cajón: (a) *Allotoca dugesii*, (b) *Goodea atripinnis*, (c) Tilapia azul (*Oreochromis aureus*)



Fuente: Elaboración propia.

Figura 7. Herpetofauna representativa del cutonalá: (a) *Kinosternum integrum*, (b) *Anolis nebulosus*, (c) *Lithobates montezumae*



Fuente: Elaboración propia.

Las aves son el grupo de vertebrados de mayor riqueza en CUTonalá; se han identificado 49 especies, de las cuales 27 son terrestres y 22 acuáticas. Debido a la presencia de los humedales, se incrementa su registro. Las más

abundantes son la golondrina tijereta (*Hirundo rustica*), seguido de garzas blancas (*Ardea alba*), zanates mexicanos (*Quiscalus mexicanus*), tordos ojos rojos (*Molotrus aeneus*), etcétera. Las especies de aves con alguna categoría en la NOM-059-Semarnat-2010 son *Anas platyrhynchos*, *A. diazi*, *Tachybaptus dominicus* y *Rallus longirostris* (tabla 2).

Tabla 2. Especies de aves registradas en el coronalá. Se señalan las que están en alguna categoría de riesgo

Número	Terrestres	Acuáticas
1	<i>Agelaius phoeniceus</i>	<i>Anas acuta</i>
2	<i>Amazilia berillina</i>	<i>A. diazi</i>
3	<i>Bubulcus ibis</i>	<i>A. platyrhynchos</i>
4	<i>Caracara cheriway</i>	<i>Ardea alba</i>
5	<i>Catherpes mexicanus</i>	<i>A. herodias</i>
6	<i>Columbina inca</i>	<i>Butorides virescens</i>
7	<i>Coragyps atratus</i>	<i>Dendrocygna autumnalis</i>
8	<i>Crotophaga sulcirostris</i>	<i>D. bicolor</i>
9	<i>Egretta thula</i>	<i>Egretta tricolor</i>
10	<i>Haemorrhous mexicanus</i>	<i>Gallinula galeata</i>
11	<i>Hirundo rustica</i>	<i>Himantopus mexicanus</i>
12	<i>Lanius ludovicianus</i>	<i>Jacana spinosa</i>
13	<i>Melanerpes formicivorus</i>	<i>Nyctanasa violácea</i>
14	<i>Molothrus aeneus</i>	<i>Nycticorax nycticorax</i>
15	<i>Pandion haliaetus</i>	<i>Plegadis chihi</i>
16	<i>Passer domesticus</i>	<i>Phalacrocorax brasilianus</i>
17	<i>Pitangus sulphuratus</i>	<i>Podylimbus podiceps</i>
18	<i>Poliptilia caerulea</i>	<i>Porphyrio martinica</i>
19	<i>Pyrocephalus rubinus</i>	<i>Porzana carolina</i>
20	<i>Quiscalus mexicanus</i>	<i>Rallus longirostris</i>
21	<i>Sporophila torqueola</i>	<i>Spatula clypeata</i>
22	<i>Strotopelia decaocto</i>	<i>Tachybaptus dominicus</i>
23	<i>Tito alba</i>	
24	<i>Toxostoma curvirostre</i>	
25	<i>Tyranus melancholicus</i>	
26	<i>Xanthocephalus xanthocephalus</i>	
27	<i>Zenaida macroura</i>	

Fuente: Elaboración propia.

El segundo grupo más abundante, el de los mamíferos, está representado por 17 especies: *Didelphis virginiana*, *Dasyopus novemcintus*, *Sylvilagus floridanus*, *Spermophilus variegatus*, *Mus musculus*, *Rattus rattus*, *Reithrodontomys fulvescens*, *Sigmodon mascotensis*, *Liomys pictus*, *Urocyon cinereoargenteus*, *Canis latrans*, *Mustela frenata*, *Mephitis macroura*, *Spilogale gracilis*, *Desmodus rotundus*, *Artibeus jamaicensis* y *Artibeus litur* (figura 8).

Figura 8. Ejemplo de mamíferos terrestres presentes en el CUTonalá. Izquierda: *Spilogale gracilis*. Derecha: *Mustela frenata* atropellada



Fuente: Elaboración propia.

Conclusiones

La calidad del agua de la presa El Cajón es aceptable. Puede mejorarse si se detiene el vertido de sustancias de desecho, como aguas residuales de las casas aledañas, basura y residuos domésticos principalmente. La presencia de una comunidad de especies de peces, anfibios y aves acuáticas demuestra que el estado ambiental de la presa y el humedal es bueno, lo suficiente para sustentar las comunidades biológicas de plantas, animales y microorganismos. Es importante mejorar las condiciones que ya se tienen para evitar el colapso del ecosistema provocado por la desaparición de especies. La presa El Cajón debe ser un sitio de conservación, investigación, recreación y recursos para la comunidad universitaria y civil aledaña.

La fauna de vertebrados en el CUTonalá está representada al menos por 86 especies: 8 de peces, 4 de anfibios, 6 de reptiles, 49 de aves y 17 de ma-

míferos (figura 5). Algunas de ellas se consideran especies invasoras (Born-Schmidt, Servole y Koleff, 2017), como es el caso de la tilapia azul (*Oreochromis aureus*) y el gorrión doméstico (*Passer domesticus*). Es importante cuidar la fauna endémica y autóctona de la región y el país, ya que de eso depende el buen estado ambiental de los ecosistemas. Aunado a esto, se ha notado un aumento de la fauna feral en el cutonalá, representada por gatos y perros que depredan a aves, reptiles, anfibios y mamíferos. Creemos pertinente implementar medidas para su control, como la esterilización, y asignar espacios especiales para su contención, a fin de que la fauna local no sea amenazada y los animales domésticos abandonados puedan tener una mejor calidad de vida.

En el balance global el estado ambiental de los humedales del cutonalá es bueno, con puntos de mejora que se pueden cubrir con la participación y apoyo de las comunidades universitarias, civiles, gubernamentales y privadas.

Bibliografía

- Born-Schmidt, G., Servole, J. P., Koleff, P. (2017). La Estrategia Nacional sobre Especies Invasoras: avances en su puesta en práctica. *Principales retos que especies exóticas invasoras*, 35.
- Carrillo López, D., Carvajal Aguilar, S., Coto Campos, J., Salgado Silva, V., Herrera Núñez, J., Rojas Cantillano, D., Benavidez, C. (2013). Variación del oxígeno disuelto en el Río Burío-Quebrada Seca, Heredia, Costa Rica, en el periodo 2005-2010.
- Campo, R. G., Escobar Jiménez, K. (2021). Territorio anfibio y despojo en una zona de humedales protegida del Caribe colombiano. *Revista de Estudios Sociales*, (76), 75-92.
- Espinosa, H., Fuentes, P., Gaspar-Dillanes, M. T. (1993). Peces dulceacuícolas mexicanos, Listado Faunístico III, Publicación Especial, p. 100. IBUNAM
- Flores-Villela, O. (1993). Herpetofauna of Mexico: distribution and endemism. *Biological diversity of Mexico: origins and distribution*, 253-280.
- Hernández, M. E. (2010). Suelos de humedales como sumideros de carbono y fuentes de metano. *Terra Latinoamericana*, 28(2), 139-147.
- Marín Muñiz, J. L., Hernández Alarcón, M. E., Moreno-Casasola, B. P. (2011). Secuestro de carbono en suelos humedales costeros de agua dulce en Veracruz. *Tropical and Subtropical Agroecosystems*, 13(3), 365-372.
- Miller, R. R., Minckley, W. L., Norris, S. M. (2005). *Freshwater fishes of Mexico*. The University of Chicago Press, Chicago (2005), p. 650.
- Núñez, K., Zárate-Betzel, G., Ortiz, F., Mendoza, M., Vera, M., Weiler, A., Duré, M. (2022).

- Diversidad alfa, beta y gamma de ensamblajes de los anuros y reptiles de humedales del Ypoá, Paraguay. *Neotropical Biodiversity*, 8(1), 89-98.
- Pacheco, V., Pacheco, J., Zevallos, A., Valentin, P., Salvador, J., Ticona, G. (2020). Trabajos originales Mamíferos pequeños de humedales de la costa central del Perú. *Revista peruana de biología*, 27(4), 483-498.
- Peterson, R. T., Chalif, E. L. (1989). Aves de México. *Guía de campo*. Editorial Diana. México, D. F.
- Spinola, R. M. (2004). Ceballos, G., y J. A. Simonetti (eds.) (2002). Diversidad y Conservación de los Mamíferos Neotropicales. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad, México, D. F., México. 582 pp.

IV. Ecotecnologías como parte de la economía circular para la disminución de la pobreza energética en zonas periurbanas de la Zona Metropolitana de Guadalajara

MÓNICA CAMAS NÁFATE*

ALBERTO CORONADO MENDOZA**

MAYRA GAMBOA GONZÁLEZ***

CARLOS JESAHEL VEGA GÓMEZ****

DOI: <https://doi.org/10.52501/cc.178.04>

Resumen

El capítulo analiza la intersección de la periurbanización y la pobreza energética en Lomas del Centinela, México. En esta comunidad, la transición de zonas rurales a urbanas ha generado marginalización, carencia de infraestructuras básicas y limitado acceso a servicios esenciales. El estudio aborda la pobreza energética en este contexto, especialmente en áreas de diversos climas. Se propone una metodología de diagnóstico basada en parámetros adaptables a distintas regiones. La investigación resalta la relación entre la pobreza energética y el acceso a servicios básicos, como agua y electricidad. Dos proyectos de ecotecnologías son presentados: una estufa y un deshidratador solares. Estas iniciativas no sólo abordan la pobreza energética, sino que también empoderan a la comunidad por medio de la educación en energías renovables y prácticas sostenibles, involucrando especialmente a

* Doctora en Agua y Energía. Departamento de Estudios del Agua y de la Energía, Centro Universitario de Tonalá, Universidad de Guadalajara, México. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8491-3901>

** Doctor en Energías Renovables y Eficiencia Energética. Departamento de Estudios del Agua y a Energía, Centro Universitario de Tonalá, Universidad de Guadalajara, México. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6283-4911>

*** Doctora en Ciudad, Territorio y Sustentabilidad. Departamento de Proyectos Urbanísticos. Centro Universitario de Arte, Arquitectura y Diseño, Universidad de Guadalajara, México. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1260-0241>

**** Doctor en Agua y Energía. Departamento de Innovación Tecnológica de la División de Desarrollo Tecnológico e Ingenierías del Centro Universitario de Tlajomulco, Universidad de Guadalajara, México. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2561-7763>

las mujeres. En conclusión, la implementación de ecotecnologías en comunidades periurbanas, como Lomas del Centinela, puede mejorar la calidad de vida al reducir la pobreza energética y promover la seguridad alimentaria. Adaptar estas soluciones a necesidades específicas y fomentar la educación y el emprendimiento sostenible resultan fundamentales para lograr un impacto significativo.

Palabras clave: *Periurbanización, pobreza energética, ecotecnologías, realidad de vida.*

Antecedentes, las zonas periurbanas

El término *periurbanización* se refiere a un proceso, a menudo muy dinámico, en el que las zonas rurales situadas en las afueras de las ciudades establecidas adquieren un carácter más urbano.

Esta transformación se produce en términos físicos, económicos y sociales y, a menudo, de forma fragmentaria. El desarrollo periurbano suele implicar un rápido cambio social, ya que las pequeñas comunidades agrícolas se ven obligadas a adaptarse a un estilo de vida urbano o industrial en muy poco tiempo. Los altos niveles de inmigración a las ciudades son un motor importante del cambio social. El rápido deterioro ambiental y la acumulación de infraestructura suelen ser otra característica del paisaje periurbano. Por lo general, la periurbanización se ve estimulada por una infusión de nuevas inversiones, generalmente del exterior, incluida la inversión extranjera directa (Webster y Muller, 2016).

En una de las definiciones de zonas periurbanas dadas para Latinoamérica se concibe a las zonas de transición, en cuyo espacio se desarrollan actividades propias tanto de territorios rurales como urbanos, con tensiones en modos de uso de suelo. Para este concepto se toman en cuenta tanto las actividades productivas como las problemáticas de índole social, disponibilidad del agua y competencia por recursos humanos (Feito, 2018). También se entiende la periurbanización como el espacio que contrasta físicamente la continuidad entre la vida rural y la concentración urbana. Es un espacio de transición que se manifiesta en la constitución de *coronas* o *espacios perifé-*

ricos concéntricos (Ávila Sánchez, 2009). La globalización, mediante la expresión territorial de las megaciudades, ha favorecido un proceso de dispersión urbana, expresado en el desarrollo de nuevas y diversas actividades económicas (sobre todo de servicio), así como el desarrollo de infraestructura urbana y del transporte, además de la desconcentración de funciones hacia ciudades medias y pequeñas, o bien hacia espacios rurales o urbano-rurales dentro de una región.

Características económicas y sociales generales

Las principales características del proceso de periurbanización, particularmente en los países en desarrollo, incluyen:

- Estructura económica cambiante, que abarca un cambio de una economía basada en la agricultura a una economía dominada por la manufactura.
- Cambio en la estructura del empleo, pasando de la agricultura a la manufactura.
- El rápido crecimiento de la población y la urbanización, un fenómeno que a menudo no se captura en los datos oficiales porque las poblaciones de las regiones periurbanas tienden a estar significativamente subestimadas; en muchos países los inmigrantes no se registran oficialmente como residentes locales. Muchas áreas periurbanas, además, todavía se definen como rurales, lo que contribuye significativamente a un recuento insuficiente de la población urbana.
- Cambio de los patrones de desarrollo espacial y aumento de los costos de la tierra.

Mientras que, en los factores sociales, tenemos las siguientes características (González-Arellano, Larralde-Corona y Cruz-Bello, 2021):

- promedio de hijos
- habitantes por vivienda
- proporción de habitantes en la vivienda
- infraestructura hidrosanitaria

- escolaridad
- participación como parte de una comunidad autóctona

En México, la expansión en las periferias urbanas se detonó con mayor rapidez en la década de 1990 a partir de dos eventos que modificaron el derecho urbanístico: la llamada privatización de los terrenos ejidales, derivada de la reforma al art. 27 de la Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos en 1992, y la también reforma constitucional al art. 115 (en 1983 y en 1999), que otorgó atribuciones al municipio para encargarse de la administración y desarrollo urbano dentro de sus jurisdicciones (Olvera, 2015).

Lo anterior derivó en un crecimiento acelerado en la mayoría de las ciudades del país a causa de dos tipos de ocupación: (a) la compra-venta ilegal y fraccionada en pequeños lotes de terrenos ejidales, lo cual dio lugar a los asentamientos de origen informal, también conocidos como urbanización social o popular; (b) la adquisición de grandes extensiones de terreno agrario, convertido posteriormente en suelo urbano para el desarrollo de grandes fraccionamientos de vivienda (desarrollo formal o planificado), que en ocasiones y durante una o varias etapas del proceso quedaban fuera de los marcos jurídicos regulatorios (Olvera, 2015; Iracheta, 2015). El caso en el cual se llevó a cabo el presente trabajo corresponde a la primera tipología de ocupación de suelo informal.

Descripción de la zona de estudio, Lomas del Centinela

Lomas del Centinela es una comunidad de más de 9 000 habitantes (INEGI, 2020 y 2021), ubicada en la periferia del municipio de Zapopan, dentro del área metropolitana de Guadalajara. El área se designa como de atención prioritaria de acuerdo con los diagnósticos del municipio y se ubica entre dos vecindarios contrastantes: (a) Las Mesas, donde las personas viven en condiciones de pobreza (hambre, desnutrición, violencia y delincuencia), y (b) Bosques de San Isidro (conocido como Las Cañadas), una zona residencial de altos ingresos con áreas privadas internas, ubicada en colindancia con el bosque de San Isidro (Ayuntamiento de Zapopan y ONU-Hábitat, 2015).

Se trata de un asentamiento de origen informal, relativamente reciente. Sus pobladores más antiguos tienen entre 30 y 50 años en el lugar, que se localiza en la periferia del área metropolitana de Guadalajara (AMG), colindando con el bosque del Centinela. La población es joven y hay un alto porcentaje de niños que están transitando a la etapa de la adolescencia, lo cual para el ayuntamiento de Zapopan constituye un área de oportunidad para implementar acciones que permitan una orientación adecuada de ese sector de la población mediante la educación y el arte, para evitar con ello que se involucren en actividades ilícitas.

Aunque Lomas del Centinela tiene condiciones físicas y de desarrollo similares a un espacio semirrural, la actividad de sus habitantes está estrechamente vinculada con el ámbito urbano. La mayoría de los hombres trabajan en oficios de la construcción, como carpintería y albañilería, y las mujeres como empleadas domésticas. Esta situación, aunada a diversos conflictos internos que se viven dentro de las familias, hace que exista muy poca participación de hombres adultos y jóvenes en los asuntos de la comunidad. Asimismo, existen diferentes tipos de violencia que afectan a las mujeres y los niños. Aunado a la problemática social, en esta colonia, como en otros casos de asentamientos de origen informal ubicados en las zonas marginales de la ciudad, se presentan problemas de escasez de servicios de infraestructura básica y de acceso a fuentes de empleo y equipamiento mediante medios de movilidad eficiente, además de condiciones precarias de vivienda.

Diagnóstico de la pobreza energética

Parámetros y herramientas metodológicas

En una sociedad, las necesidades cambian de acuerdo con las costumbres, cultura y crecimiento económico de la comunidad, así como con el medio geográfico en que se desenvuelven. Esta idea ha sido adaptada por algunos autores al momento de definir a la pobreza energética como la ausencia parcial o total de la satisfacción de estas necesidades. En el campo de la energía, abarca diferentes necesidades para satisfacer, ya que el acceso a algunos servicios hace más factible el hecho de establecer una satisfacción de

las necesidades energéticas y, con ella incluso, modificarse los índices de calidad de vida. Al depender de cada región, el acceso o las necesidades mismas cambian. Por ejemplo, en regiones de Europa, la evaluación de este índice de pobreza energética recae en gran medida en alcanzar el confort térmico dentro de las casas por las bajas temperaturas que se pueden alcanzar durante el invierno, además de contar con un sistema de calefacción para el agua dentro de las infraestructuras, debido al congelamiento del vital líquido en su interior por las mismas causas. Esta metodología no podría ser aplicable en Latinoamérica, tomando en cuenta que en regiones al noreste de México se llega a temperaturas superiores a 45°C a la sombra (Conagua y SMN, 2023). Entonces, la definición de confort térmico se ve cambiada debido al contexto medioambiental de la localidad.

El acceso de ciertos servicios, como combustible para la cocción de los alimentos o electricidad para la preservación de éstos, depende también de factores propios de la comunidad en cuestión. Esta característica se remarca con mayor impacto en zonas periurbanas, como lo es Lomas del Centinela. En la ZMG existen diferentes métodos de obtención de gas natural o licuado del petróleo (LP), lo mismo que distribuidores del combustible en tanques individuales, tanques estacionarios e incluso una red de tuberías para distribución de este servicio a ciertas zonas. Pero, debido a la falta de infraestructuras de acceso, pavimentación y regularización de las propiedades en Lomas del Centinela, esto impide que los distribuidores lleguen y que las personas de la comunidad se acerquen a la zona de mayor tránsito, como el periférico norte, donde esperan entre una y cuatro horas con un carro estibador personal para comprar el tanque de gas que les servirá para los servicios de cocción de alimentos; y quienes no cuentan con la situación económica para permitirse un tanque de gas LP recurren a recursos como leña e incluso basura orgánica o sin clasificar, lo cual pone en riesgo su salud debido a los gases tóxicos que se generan en la combustión. Para la conservación de alimentos, la comunidad se ha visto afectada debido a la humedad presente en el interior de las casas, además de la obsolescencia de algunos de sus dispositivos de refrigeración, que no son eficientes energéticamente que prefieren usar sólo para lo indispensable.

Respecto a la breve descripción de la comunidad, referente a áreas de oportunidad encontradas con ella, hay una definición que nos ofrecen Rojas

e Ibáñez (2016), donde indican que el acceso a la energía debe tomar en cuenta el alcance de los servicios que provengan de una fuente limpia, los cuales deben ser confiables para acceder a ellos con la mayor estabilidad posible, al grado de que le permitan al individuo cocinar, iluminar su hogar, comunicarse con otros individuos e incluso permitirle prepararse para sus actividades productivas. Con base en esto, la comunidad de Lomas del Centinela puede clasificarse como una población *vulnerable* energéticamente hablando.

También se debe considerar que los habitantes primero deben satisfacer sus necesidades básicas, como el acceso a los alimentos, educación y salud, y después cubrir los gastos energéticos correspondientes (Heindl, 2015).

Los individuos que viven su día a día en pobreza energética generalmente no pueden reconocer la existencia de ésta. Un sector de la población en la Unión Europea (UE) ha reportado su incapacidad de cubrir los gastos de los servicios energéticos en temporadas invernales, por lo que esta preocupación aumenta y genera un estrés que altera la calidad de vida de los habitantes. En Latinoamérica se ha reportado el aumento en el estrés de la red eléctrica en las temporadas de calor por consecuencia del incremento de la demanda eléctrica por parte de los usuarios que buscan un confort térmico en sus hogares mediante el uso de ventiladores y climatización habitacional. Por ello, en México, la facturación eléctrica tiene considerada una demanda horaria (con mayor coste a la población en los picos de demanda) y también algunas tarifas regionales que favorecen con un menor costo por kilowatt/hora a la población, debido a las altas temperaturas.

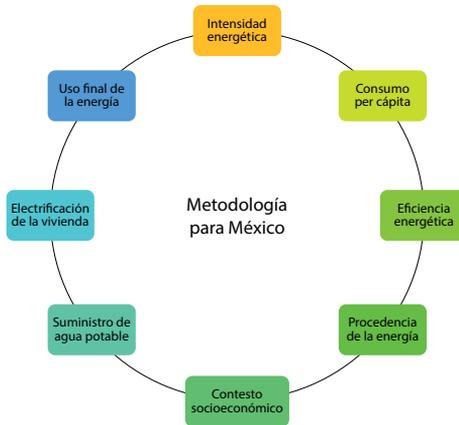
Figura 1. Parámetros dentro del marco europeo para el diagnóstico de la pobreza energética



Fuente: Elaboración propia.

En la figura 1 se muestran los tres parámetros más relevantes para la estimación de la pobreza energética en Europa. En el caso de México, esas tres variables son el parteaguas del diagnóstico; sin embargo, se añaden otras variables que pueden cambiar de región a región dentro del país, incluso de calle a calle, lo que hace que su análisis sea más profundo, que otorgue más detalle de la situación del hogar estudiado y, por ende, que la propuesta sea más adecuada y personalizada para el usuario (figura 2).

Figura 2. Parámetros para el diagnóstico de pobreza energética dentro de un escenario mexicano



Fuente: Elaboración propia.

Para el caso específico de México es necesario analizar a más detalle dos de esos parámetros. El primero es el uso final de la energía, ya que éste se divide en las aplicaciones mostradas en la figura 3, y la prioridad de ellas varía en cada región según sea la satisfacción de la necesidad.

Figura 3. Dimensiones analizadas dentro del uso final de la energía



Fuente: Elaboración propia.

El segundo aspecto importante es el acceso al agua potable. En México, los servicios de agua potable se brindan por parte de la municipalidad o de agrupaciones territoriales. Tal es el caso del AMG, ya que se integra por los municipios de San Pedro Tlaquepaque, Tonalá, Zapopan, Tlajomulco de Zúñiga, El Salto, Juanacatlán, Ixtlahuacán de los Membrillos, Acatlán de Juárez, Zapotlanejo y el citado Guadalajara, que en conjunto comparten una constante conurbación (Jalisco, 2023). El Sistema Intermunicipal de los Servicios de Agua Potable y Alcantarillado (Siapa) es la instancia encargada de dotar con los servicios de agua potable, alcantarillado y saneamiento en cantidad y calidad suficiente a los habitantes de la ZMG, para contribuir a su salud y bienestar (Siapa, 2023).

Esta entidad tiene cobertura en toda la ZMG; sin embargo, debido al fenómeno de la periurbanización (asentamientos legales e ilegales), se ha salido de la zona de cobertura. Los servicios de abasto del líquido y el servicio de alcantarillado requieren cantidades de energía que garantizan el acceso a éstos. No obstante, la falta de infraestructura se ve reflejada principalmente en:

- a) La red de abasto, la cual está compuesta de tubería, canales, cisternas, bombas y administración en general. Depende de un protocolo de expansión que no han tomado en cuenta el crecimiento veloz que ha tenido los diferentes asentamientos. Además, se debe garantizar la legalidad de estos asentamientos, ya que mediante la recaudación de impuestos se permite la inversión en infraestructura de servicios hidrosanitarios.
- b) El sistema de alcantarillado para el tratamiento posterior de las aguas, el cual no está interconectado a las casas, lo cual aumenta problemas de salud debido a la falta de salubridad en los deshechos.

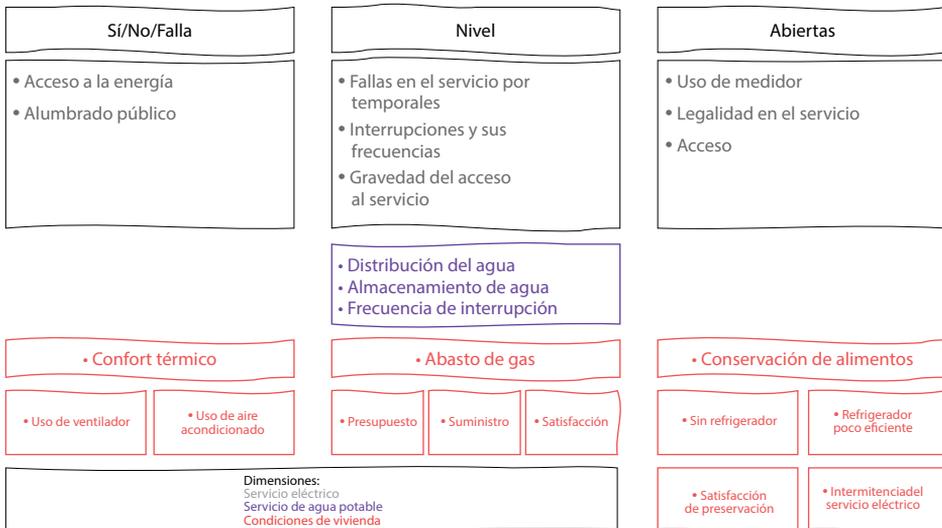
Un tercer componente en lo que se refiere al servicio de agua tiene que ver con el usuario. Este componente corresponde al almacenamiento del agua en caso de tener el servicio. Incluso si no es posible obtenerlo mediante el Siapa, almacenar el agua es un factor importante para garantizar la satisfacción de sus necesidades energéticas. En la zona estudiada las personas que no tenían acceso al servicio público debían optar por la compra del

líquido a distribuidores de agua privados y a su vez, invertir en recipientes que permitieran almacenar agua por un mayor tiempo. Esta inversión cubre la necesidad del vital líquido, pero hace que el recurso económico no sea lo suficiente para satisfacer las necesidades energéticas previamente descritas tanto por el marco europeo como por el marco mexicano (García-Ochoa y Graizbord, 2016).

Para el diagnóstico fue necesario realizar una encuesta, además de una sectorización de zona en polígonos de viviendas. Esto nos permitió identificar las principales características de cada zona, delimitar la información e identificar características particulares de cada polígono con su respectivo origen, como puede apreciarse en la figura 4.

Preguntas que componen la encuesta:

Figura 4. Estructura de las dimensiones de la encuesta preparada para diagnóstico



Fuente: Elaboración propia.

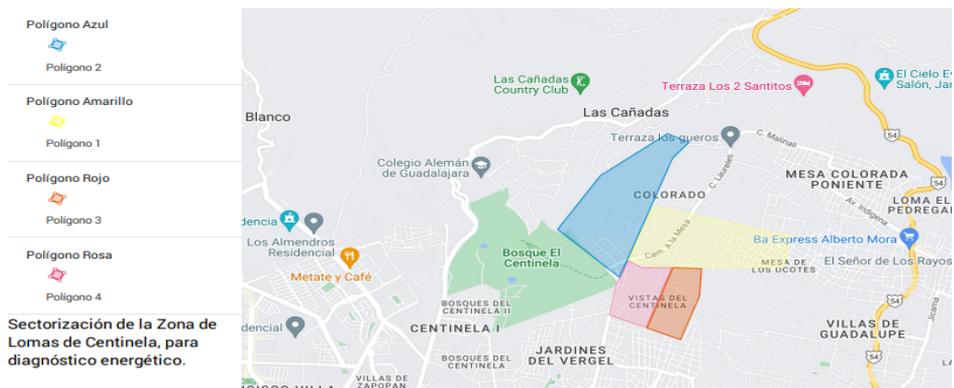
En el esquema anterior se pueden observar las tres dimensiones de la problemática en la comunidad. Con el propósito de lograrlo, se desarrolló un cuestionario que constaba de preguntas diseñadas para obtener información sobre el estado de los servicios en relación con los habitantes, evitando exponer deficiencias o problemáticas específicas que pudieran afectar

su susceptibilidad. No obstante, el objetivo era identificar y cuantificar dichas carencias y problemáticas de manera precisa.

La comunidad se dividió en polígonos. Cada una de estas nuevas secciones manifiesta características diferentes. La sectorización se dio de la siguiente manera:

Figura 5. Sectorización de la comunidad de acuerdo con la información obtenida por la encuesta

Lomas del Centinela



Fuente: Elaboración propia.

El diagnóstico que se obtuvo con los resultados de la encuesta identificó problemáticas y acciones que se deberían resolver a corto plazo, y aquellas de mediano y largo plazo pueden ser diseñadas y proyectadas a futuro. Esto con el objetivo principal de reducir el índice de pobreza energética propio de los polígonos.

Cada uno de estos polígonos presentaba características muy diferentes, a pesar de encontrarse dentro de la misma comunidad.

En la siguiente tabla se concentran las características básicas de cada polígono:

Tabla 1. Características de la comunidad por polígono

Polígono	Acceso a la electricidad	Ingreso estable	Regularización del terreno	Acceso al agua	Condiciones de vivienda
1	Bueno				
2	Medio	Bajo	Bueno	Medio	Bajo
3	Bajo		Medio		Bajo
4	Bajo				
	Bueno	Medio	Bajo		

Fuente: Elaboración propia.

Con el resultado de las encuestas se pudo detectar cuáles eran las áreas prioritarias por resolver y los alcances a corto, mediano y largo plazo, con el objetivo final de reducir el índice de pobreza energética, el cual puede observarse a continuación:

Tabla 2. Índice de pobreza energética (IPE) por polígono

Polígono	IPE (promedio)	IPE (máximo)
Amarrillo (1)	0.555	0.73
Azul (2)	0.566	0.74
Rojo (3)	0.51	0.74
Rosa (4)	0.557	0.7

Fuente: Elaboración propia.

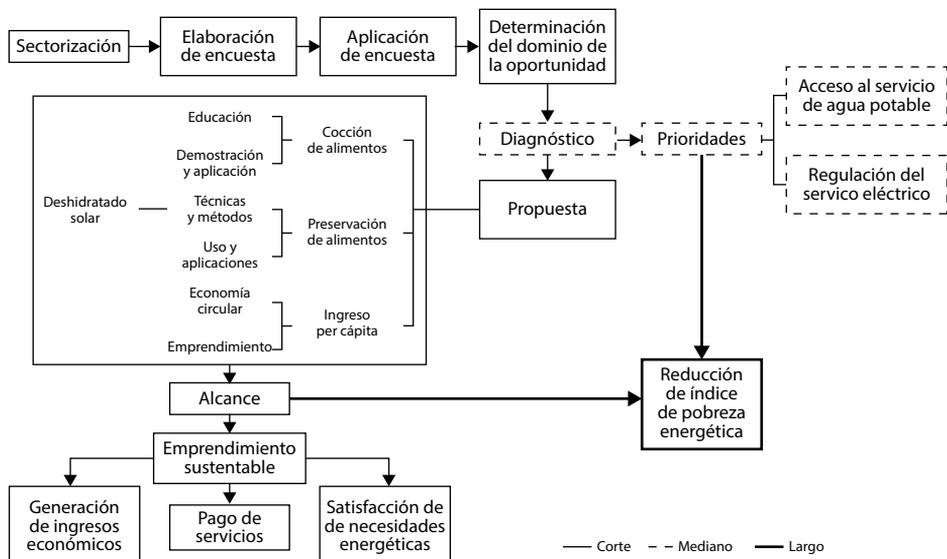
Estos resultados nos permitieron establecer una metodología que busca poner alcances y objetivos. La finalidad es trabajarlos en conjunto con la comunidad, a la vez que vamos aprendiendo con ella cómo va cambiando su calidad de vida y la percepción de los habitantes al cambio mismo.

En la figura 6 podemos ver la metodología obtenida para trabajar con la comunidad desde el punto de vista del IPE. Se pueden identificar áreas de oportunidad y sus estrategias a corto, mediano y largo plazo. En dicha comunidad se ha empezado a trabajar con *ecotecnologías* que serán abordadas en la siguiente sección.

Uno de los obstáculos más importantes diagnosticados en esta comunidad fue el acceso a la información veraz, así como también la regularidad en servicios básicos, como el agua y la electricidad. Sin embargo, esto se debe a un factor en común: el bajo ingreso económico per cápita de la comunidad, debido a que en su mayoría los integrantes no cuentan con fuentes de em-

pleos formales o con contratos laborales que establezcan un salario digno para satisfacer esas necesidades. Esto recuerda al marco europeo de diagnóstico de pobreza energética, donde no es posible pagar dichos servicios. Sin embargo, en el caso de Latinoamérica entra en juego que también no es posible satisfacer necesidades básicas, como la alimentación, educación e incluso el transporte, para llevar a cabo las actividades laborales de la comunidad.

Figura 6. Metodología de trabajo en conjunto con la comunidad, propuestas y objetivo final



Fuente: Elaboración propia.

Ecotecnologías para la economía circular

El término *ecotecnología* se ha utilizado desde principios de la década de 1970 para describir combinaciones de prácticas relacionadas con el medio ambiente y la intervención tecnológica (Haddaway, McConville y Piniewski, 2018).

La ecotecnología exige el apoyo y la cooperación de la academia, la industria y el gobierno. El tema crítico es cómo implementar la ecotecnología

como práctica de ingeniería. “La ecotecnología se basa en una comprensión profunda de los ecosistemas. Es un método de ingeniería adaptado al material ambiental local para reflejar los principios ecológicos. La ecotecnología hace hincapié en pensar el problema desde un punto de vista holístico” (Chou, Lin y Lin, 2007, p. 270).

Mediante el diagnóstico se denota la necesidad de mejorar el contexto en el cual la comunidad consigue la cocción de los alimentos, preserva alimentos y genera ingresos. Para esto se pueden explorar dos tecnologías termosolares activas: la cocción y el deshidratado solar.

Estufa solar

La cocción solar tiene como propósito usar la radiación solar y usarla como fuente de calor para la cocción de alimentos gracias al diseño de una estufa solar. Usando principios físicos, como la radiación del cuerpo negro, transferencia de calor y solarimetría, se elaboró un diseño adecuado para las condiciones meteorológicas de la comunidad, con la finalidad principal de aplicar la ciencia a una problemática social.

Existen diferentes modelos y diseños. En esta ocasión se optó por usar una cocina solar tipo caja. Este modelo en específico permite que su construcción sea sencilla y que se expliquen todos los principios que permiten su funcionamiento.

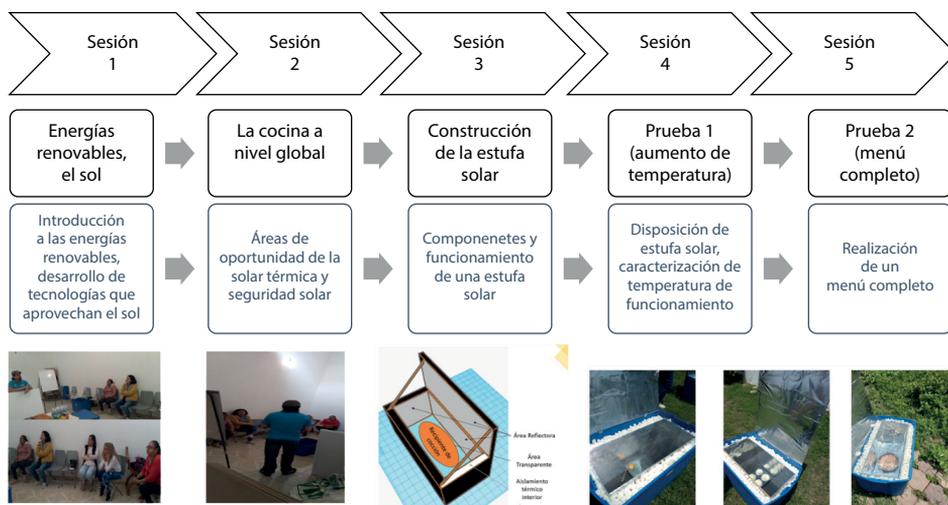
Pese a esto, se observa cierta apatía hacia la energía solar. La comunidad relaciona el sol y el término *radiación* con enfermedades como el cáncer, por lo que la primera parte del proceso de adaptación de la ecotecnología en la comunidad fue la educación. Para ello se impartió un taller donde explicamos a la comunidad cómo el sol siempre ha tenido una vital importancia como recurso natural, cómo hemos podido aprovecharlo a lo largo de los años y cómo hemos aprendido a protegernos de las consecuencias que tendría su mal aprovechamiento en nuestro cuerpo.

En ese taller, diseñado para jefas de familia, ellas aprendieron los cuidados que debemos tener, en términos generales, con el sol, tales como el uso del bloqueador y su importancia en la salud de la piel y prevención del cáncer dermatológico. También aprendieron las medidas de precaución durante

la canícula (temporada con altas temperaturas y bajos niveles de humedad, junto con ausencia de lluvias). Las asistentes comprendieron la importancia de la protección contra los rayos ultravioleta (UV) y el aprovechamiento de la energía solar como fuente de calor para alimentos, agua y ventilación.

El taller tuvo cinco sesiones presenciales, en las cuales se organizaron actividades para construir y caracterizar una estufa solar tipo caja con materiales de bajo costo, accesibles para las asistentes, y con la elaboración final de un menú de tres tiempos.

Figura 7. Esquema de trabajo para las sesiones y talleres



Fuente: Elaboración propia.

Entre los objetivos alcanzados durante este taller se pueden enumerar:

- Socializar las energías renovables, acercando conocimientos y técnicas, conviviendo con el sol de manera sana, conociendo las precauciones que debemos tener en la vida diaria con él.
- Construir una estufa solar básica, con la que las participantes pudieron comprobar los principios de funcionamiento y aplicarlos en su vida diaria. Conocieron equipo especializado para la caracterización de los dispositivos y la importancia de cada uno de sus componentes.

- c) Realizar varias recetas con ingredientes propios de su gastronomía de acuerdo con su presupuesto.
- d) Adoptar la idea del uso de las energías renovables y que están al alcance de todos.
- e) Motivar el aprendizaje sobre las energías renovables y otras aplicaciones.

Este último punto nos llevó a emprender un segundo proyecto con la comunidad, que fue:

- Diseño de un deshidratador solar portátil para uso doméstico.
- Un taller de deshidratado solar de alimentos y economía circular, para la promoción del emprendimiento y autoempleo.

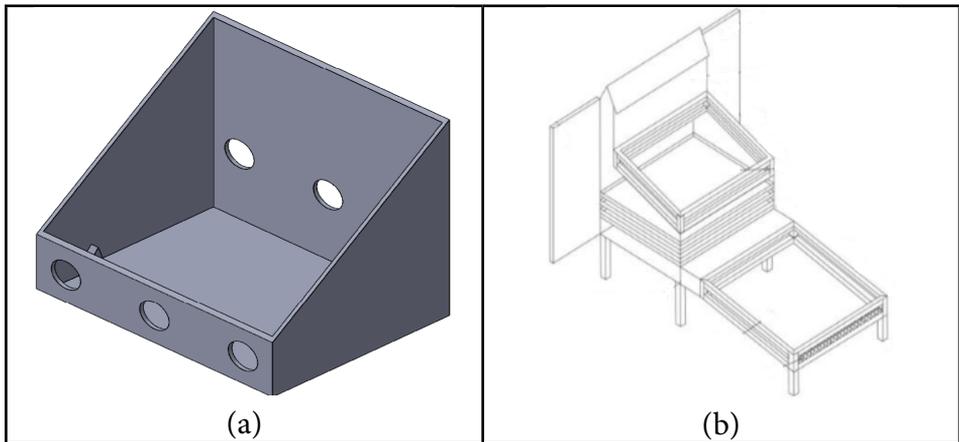
Deshidratador solar

El deshidratado de alimentos consiste en remover una cantidad de agua de ellos para evitar la proliferación de microorganismos que disminuyan su tiempo de anaquel, sin afectar sus propiedades organolépticas. Existen varias formas de deshidratado y de preservación de alimentos; sin embargo, estas tecnologías y técnicas requieren gran cantidad de energía y muchas veces no provienen de fuentes limpias. El proceso de deshidratado solar es una aplicación de la tecnología solar activa que involucra el diseño de un dispositivo específico capaz de aprovechar la radiación solar. Este dispositivo utiliza la transferencia por radiación para generar un efecto de convección en el aire circundante a fin de elevar su temperatura. El aire caliente se utiliza como un fluido de trabajo para extraer el agua presente en la superficie de los alimentos mediante evaporación. Se establece una circulación de este fluido para asegurar un proceso eficiente de deshidratación.

Existen dos clasificaciones básicas de los deshidratadores solares: de flujo natural y de flujo forzado. Cuando hablamos de flujo forzado, nos referimos a un dispositivo en el que, además de las características de diseño para aprovechamiento de la radiación solar, tenemos un diseño para optimizar y controlar las condiciones de ventilación, temperatura y humedad mediante el uso de ventiladores o extractores de aire.

Otra forma de clasificar esta ecotecnología es en función de cómo está diseñado en su forma de captación de radiación solar. Si el alimento se encuentra en contacto con la radiación solar, es de tipo directo, mientras que, si el alimento se encuentra en un compartimiento diferente de aquel en donde la radiación solar incide, interactuando únicamente con el fluido caloportador, se determina como deshidratador de tipo indirecto.

Figura 8. Tipos de deshidratadores según su captación de radiación. (a) Deshidratador solar directo. (b) Deshidratador solar indirecto



Fuente: Elaboración propia.

Se busca reubicar el deshidratado solar como una técnica de preservación de alimentos más inocua y sustentable. Esto se puede lograr gracias a las actualizaciones en los diseños, seguimiento de normas de salubridad y capacitación sobre el manejo de alimentos. Las mejoras técnicas también van de la mano con la educación sobre emprendimiento, en este caso sobre economía circular.

Lo anterior busca una mejora en la seguridad alimentaria, ya que para el año 2030 se tiene propuesto el objetivo de “Hambre cero”. Mejorando el aprovechamiento de la materia prima y de la aplicación de la energía solar térmica, se puede lograr una acción que promueva el cumplimiento de este objetivo.

Una de las principales amenazas son la vulnerabilidad climática y las condiciones meteorológicas extremas. También se determinó que la pan-

demia por COVID-19 trajo consigo consecuencias tanto en el empleo como en las formas de emprendimiento clásicas. Tuvo que modernizarse, sin dejar algunas alternativas ancestrales como el deshidratado de alimentos, además de seleccionar mejor los que se van a deshidratar. Para ello se tuvo la capacidad de capacitar a la comunidad en cuestión.

La comunidad fue partícipe de un taller sobre el manejo de mermas de primer nivel, para su aprovechamiento mediante deshidratado, con la finalidad de darle un valor agregado a mermas alimenticias, buscando:

- Disminuir el desierto alimenticio de la comunidad.
- Aprovechamiento de materia prima descartada por no cumplir “estándares de calidad y estéticos”.
- Uso de los dispositivos solares (deshidratadores) para este proceso.
- Idear un producto que sea posible producir en colectividad para que ingrese a la economía circular de alimentos orgánicos y sustentables.
- Generación de ingreso.
- Disminución de la pobreza energética.

Este proyecto se enfoca en la construcción de conocimiento para las mujeres, considerando que ellas juegan un papel determinante en la seguridad alimentaria y que han sido excluidas del acceso a la información y tecnología, por lo que enfrenta obstáculos para acceder a buenos empleos. El uso de deshidratadores solares de alimentos *in situ* representa una estrategia de adaptación frente al cambio climático y abre una oportunidad para el empoderamiento y desarrollo de capacidades locales.

La implementación del secado solar de alimentos como elemento central del sistema de economía circular facilitaría los esfuerzos para poner fin a la inseguridad alimentaria y la desnutrición. Se ve como una herramienta eficaz para conservar los alimentos y sus nutrientes (cuyo acceso suele estar condicionado por la distancia y los altos costos de la energía) y como un medio para generar ingresos mediante proyectos empresariales de base comunitaria.

En este segundo taller, la comunidad conoció diferentes formas de preservación de alimentos, los costos y el nivel tecnológico requerido, todo de una forma amigable, con la finalidad de que los miembros de la comunidad

conozcan la importancia del uso de refrigeradores eficientes para sus alimentos frescos junto con los beneficios de tiempo de anaquel conseguido con otras técnicas.

Figura 9. Comparativa entre técnicas de preservación de alimentos



Fuente: Elaboración propia.

Dentro del taller se capacitó a la comunidad sobre los pasos a seguir para la realización de un deshidratado solar de la forma inocua sugerida, mencionando lo siguiente:

Figura 10. Estructura básica del taller de deshidratado solar



Fuente: Elaboración propia.

merma de frutas y verduras para darle un valor agregado se ha convertido en un área de oportunidad importante para la comunidad.

Bibliografía

- Ávila Sánchez, H. (2009). *Periurbanización y espacios rurales en la periferia de las ciudades*. Ayuntamiento de Zapopan, ONU-Hábitat. (2015). Estrategia Territorial para la Prosperidad Urbana Zapopan 2030 (ETZ).
- Chou, W. C., Lin, W. T., y Lin, C. Y. (2007). Application of fuzzy theory and PROMETHEE technique to evaluate suitable ecotechnology method: A case study in Shihmen Reservoir Watershed, Taiwan. *Ecological Engineering*, 31(4), 269–280. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2007.08.004>
- Conagua, SMN. (2023). *Reporte de temperaturas máximas promedios, México 2023*.
- Feito, M. C. (2018). *Problems and challenges of peri-urban Buenos Aires*.
- García-Ochoa, R., y Graizbord, B. (2016). Caracterización espacial de la pobreza energética en México. Un análisis a escala subnacional Spatial characterization of fuel poverty in Mexico. An analysis at the subnational scale. In *Economía, Sociedad y Territorio: Vol. xvi*.
- González-Arellano, S., Larralde-Corona, A. H., y Cruz-Bello, G. M. (2021). The peri-urban in Mexico: Identification and sociodemographic and territorial characterization. *Papeles de población*, 27(108), 119–145. <https://doi.org/10.22185/24487147.2021.108.14>
- Haddaway Q1, N. R., Mcconville, J., y Piniewski, M. (2018). *How is the term "ecotechnology" used in the research 4 literature? A systematic review with thematic synthesis*. <https://doi.org/10.1016/j.eco>
- Heindl, P. (2015). Measuring Fuel Poverty: General Considerations and Application to German Household Data. *FinanzArchiv*, 71(2), 178. <https://doi.org/D0I: 10.1628/001522115X14285723527593>
- INEGI. (2021). Censo de Población y Vivienda 2020. Principales resultados por AGEB y Manzana Urbana. Aguascalientes: Instituto Nacional de Estadística y Geografía.
- Iracheta, A. (2015). Ciudad informal y precaria: la otra cara de la urbanización mexicana. En Olvera, G. (coord.). *La urbanización social y privada del ejido. Ensayos sobre la dualidad del desarrollo urbano en México*. Universidad Nacional Autónoma de México. 19-73.
- Jalisco. (2023). Municipios. Recuperado el 18 de febrero de 2023. Disponible en: <https://www.jalisco.gob.mx/jalisco/municipios>
- Olvera, G. (2015). Introducción: La urbanización social y de mercado del ejido. En Olvera, Guillermo (coord.). *La urbanización social y privada del ejido. Ensayos sobre la dualidad del desarrollo urbano en México*. Universidad Nacional Autónoma de México. 19-73.
- Rojas, M., y Ibáñez Martín, M. M. (2016). Planeamiento y gobernanza de las energías renovables para la inclusión social. En C. Guzowski, M. Ibáñez Martín y L. Rojas

(Eds.), *Los desafíos de la política energética en Argentina: Panorama y propuestas*. Buenos Aires: Dunken.

Sistema Intermunicipal de los Servicios de Agua Potable y Alcantarillado (SIAPA). (2023). Reglamento del Consejo Técnico del Sistema Intermunicipal para los Servicios de Agua Potable y Alcantarillado. Recuperado el 20 de enero de 2023. Disponible en: <https://info.jalisco.gob.mx/dependencia/sistema-intermunicipal-de-los-servicios-de-agua-potable-y-alcantarillado-siapa>

Soluciones Integrales para la Problemática Ambiental (SIPRA). (2019). *Diagnóstico sobre la Pérdida y Desperdicio de Alimentos en Jalisco Estudio elaborado por: Soluciones Integrales para la Problemática Ambiental (SIPRA)*. <http://semadet.jalisco.gob.mx>

Webster, D., y Muller, L. (2016). *PERI-URBANIZATION: ZONES OF RURAL-URBAN TRANSITION*.

V. Problemática socioambiental del río Santiago: procesos históricos de gestión del agua en un ecosistema vulnerable

AIDA ALEJANDRA GUERRERO DE LEÓN*

MARÍA AZUCENA ARELLANO AVELAR**

WALTER RAMÍREZ MEDA***

RODOLFO OMAR ARELLANO AGUILAR****

ALBERTO DANIEL ROCHA MUÑOZ*****

DOI: <https://doi.org/10.52501/cc.178.05>

Resumen

El deterioro hídrico del río Grande Santiago es complejo. El problema de la contaminación y los riesgos a la salud de comunidades ribereñas en la región centro de Jalisco lleva más de 50 años de provocar la movilización de la sociedad civil y procesos de investigación y gestión del agua. La investigación de la problemática socioambiental de un ecosistema requiere estudiarse desde un enfoque de cuenca, delimitando la problemática a un territorio hídrico, con el objetivo de que se pueda tener un modelo de planeación sustentable. Por lo tanto, el presente capítulo analiza una cuenca a nivel local denominada subcuenca Río Corona-Río Verde (RCRV), la cual involucra los eventos históricos en el proceso de la gestión del agua que se han

* Doctora en Ecología y Manejo de Recursos Naturales y profesora titular A del Departamento de Estudios de Agua y Energía, Centro Universitario de Tonalá, Universidad de Guadalajara, México. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3998-2649>.

** Doctora en Movilidad y Transporte, y Técnica Académica, del Departamento de Estudios de Agua y Energía, Centro Universitario de Tonalá, Universidad de Guadalajara. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5041-9430>.

*** Doctor en Ingeniería Ambiental y profesor investigador titular B del Departamento de Ingeniería de Proyectos, Centro Universitario de Ciencias Exactas e Ingenierías, Universidad de Guadalajara. ORCID: <https://orcid.org/0009-0000-7558-6403>.

**** Doctor en Ciencias Biológicas por el Instituto de Ecología, profesor titular A e investigador de la Facultad de la Universidad Autónoma de México, México. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9519-6533>.

***** Doctor en Ciencias Médicas y Profesor asociado B del Departamento de Ciencias de la Salud-Enfermedad como Proceso Individual, Centro Universitario de Tonalá, México. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1173-1736>.

desarrollado en la región, tomando como conflicto central la contaminación del agua y los riesgos a la salud pública. Se identifican los actores involucrados y las principales acciones realizadas en las toma de decisiones. Los resultados evidencian una problemática de gestión y gobernanza del río Santiago que a través de los años han sido ineficientes y desarticuladas e incluso han creado disputas entre los actores, sin visión del manejo sustentable en las cuencas y sin una metodología de análisis e intervención por parte de todos los involucrados. Por lo tanto, frente a los paradigmas de investigación en temas del agua es necesario abordar la complejidad del problema desde una perspectiva territorial local para incidir en el entorno de manera efectiva y diseñar herramientas metodológicas multidisciplinarias y transdisciplinarias para atender la problemática particular por medio de la planeación interinstitucional, sin olvidar la base comunitaria.

Palabras clave: *Gestión del agua, río Santiago, cuenca hídrica y contaminación del agua.*

Introducción

La gestión del agua en México surge de una serie de reformas institucionales que se desarrollan en el contexto internacional, como consecuencia de una política ambiental para la conservación y la sustentabilidad de los recursos hídricos. En este contexto, el estudio de la gestión integrada de las cuencas requiere el uso de esquemas y modelos de desarrollo basados en sistemas productivos social y económicamente sustentables (Maass, 2003). Es decir, que los problemas de las regiones en temas hídricos se deben estudiar de forma multidisciplinar, diseñando modelos administrativos y de gestión de recursos que puedan ser adaptables y operables en las cuencas hidrológicas de forma integrada (ecosistemas, tecnología, cultura, instituciones, normatividad, economía, etc.). Asimismo, se debe privilegiar la formación de expertos y recursos humanos capaces de reconocer las problemáticas locales, con ética y compromiso, sin los conflictos de intereses que en ocasiones entorpecen la implementación de acciones concretas para articular a todos los actores involucrados en la solución de los conflictos (GWP, 2000).

En Jalisco, el auge del desarrollo económico se contrapone con el desarrollo sustentable; señalar los problemas ambientales generados por el aumento de los sistemas productivos y por el desarrollo urbano en ocasiones va en contra de los ciudadanos que denuncian los impactos ambientales. La vinculación del sector académico y gubernamental en la región no ha tenido resultados favorables para un trabajo planificado, a pesar de la serie de investigaciones que se han llevado a cabo en la cuenca del río Santiago. En el caso de este río, se analiza un territorio a nivel local, esto es, la subcuenca Río Corona-Río Verde (CRCV), donde existe una gran complejidad de problemas socioambientales.

La cuenca padece una aguda presión del territorio por el creciente aumento poblacional del área metropolitana de Guadalajara, lo que se traduce en diversas problemáticas sociales, económicas y ambientales. Sin embargo, el problema principal es la contaminación del río Santiago y sus efectos en la salud de los pobladores ribereños.

Este trabajo forma parte de un análisis preliminar realizado en la cuenca del río Santiago y de un proyecto de Pronaces-Agua de Conachyt (programas nacionales estratégicos). Por lo tanto, este capítulo describe la problemática socioambiental de la subcuenca (CRCV) y sus procesos históricos de gestión, así como las acciones y los actores involucrados en el proceso.

Descripción de la problemática socioambiental de la subcuenca (CRCV)

El río Santiago es un ecosistema hídrico de gran importancia para Jalisco; forma parte de la cuenca Lerma-Chapala-Santiago, nace en el Lago de Chapala, pero en su recorrido por algunos municipios —como El Salto, Juana-catlán, Tonalá, Ocotlán, Poncitlán y Guadalajara— recibe una gran cantidad de descargas de aguas residuales, urbanas e industriales. Esta cuenca se localiza en la Región Hidrológico-Administrativa VIII Lerma-Santiago-Pacífico integrada por los Estados de Durango, Estado de México, Querétaro, Michoacán, Guanajuato, Aguascalientes, Jalisco, Zacatecas y Nayarit. Jalisco se localiza en la región Lerma-Santiago subregión Alto-Santiago, y la subcuenca pertenece a una de las 20 cuencas hidrológicas de este último

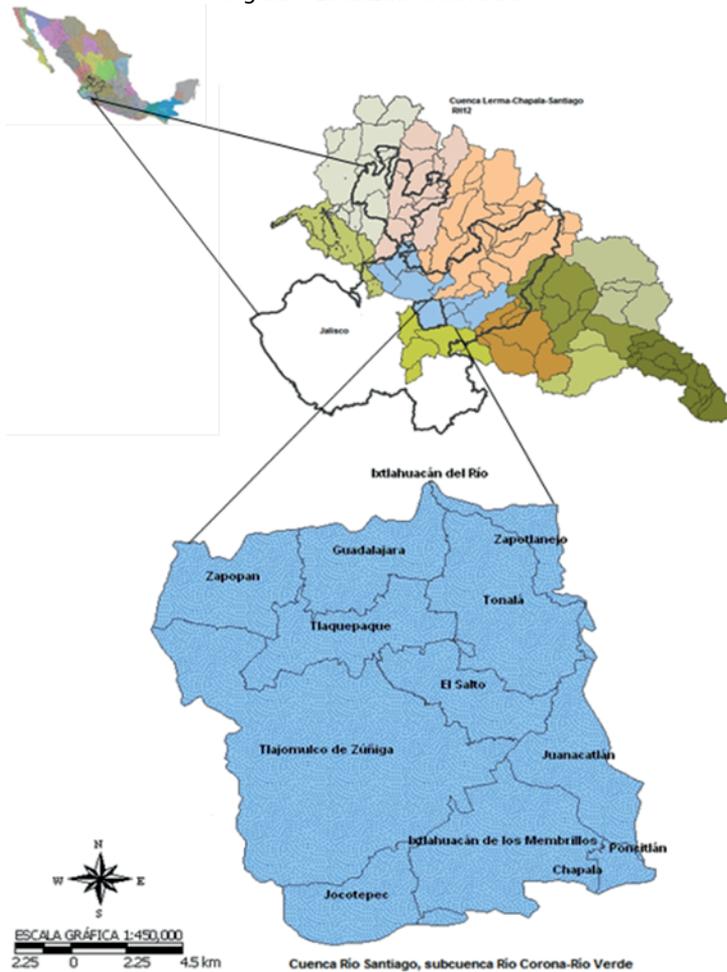
Estado, denominada río Santiago-Guadalajara (RH12-E), la cual abarca 35 municipios, algunos de la región (CEA, 2023).

Para nuestro estudio, delimitamos la subcuenca Río Corona-Río Verde (CRCV) que comprende los municipios del área metropolitana de Guadalajara: Zapotlanejo, Chapala, Jocotepec, Ixtlahuacán de los Membrillos, Juanaacatlán, Tlajomulco de Zuñiga, Tlaquepaque, Tonalá, El Salto, Guadalajara y Zapopan. La importancia de la cuenca CRCV no radica sólo en la población sino en todos los procesos ecológicos y ambientales que tienen lugar en el territorio de la zona. En la figura 1 se muestra la delimitación de la cuenca en el contexto estatal y nacional.

La subcuenca tiene una superficie aproximada de 1508 km², su clima es semicálido-subhúmedo, con temperaturas promedio mensuales de 19 °C y mínimas de 9.7 °C. La precipitación media anual es de 890.31 mm (CEAS, 2004). Los suelos dominantes de la región —Litosol (I), Feocem Háplico (Hh), Vertizol Pélico (Vp), Regosol Eutrigo (Re)— y los suelos Litosol y Feocem Háplico característicos del área metropolitana de Guadalajara son ricos en materia orgánica de alta permeabilidad y susceptibles a la erosión (INEGI, 2020).

El río Santiago es la corriente principal de la subcuenca. En este tramo de la cuenca inicia el río aguas arriba, en el Lago de Chapala, a una altura 1528 metros sobre el nivel del mar (msnm). Pasa por Poncitlán, atraviesa el municipio de Ixtlahuacán de los Membrillos, recorre aguas abajo los municipios de Juanaacatlán y El Salto, luego pasa por Tonalá y Zapotlanejo, hasta su confluencia con el río Verde, en Guadalajara, a una altura de 990 msnm. La primera aportación de agua que recibe el río Santiago es la del río Zula, en Chapala, el cual confluye por la margen derecha a la altura de la ciudad de Ocotlán, muy cerca del inicio del cauce del río Santiago. En Poncitlán existen dos aportaciones, ambas por la margen derecha del río Santiago. El arroyo Agua Fría y el arroyo La Cañada. Después de estas corrientes, las aportaciones al río Santiago son muy pequeñas: en la localidad de La Capilla, por su margen izquierda, de la que recibe agua del arroyo Los Sabinos, y más adelante, aguas arriba, de la población de El Salto. Y por la margen izquierda recibe la aportación del arroyo El Ahogado. En Puente Grande, en la zona en que el río se interna en la barranca, recibe la aportación del río La Laja, por la margen derecha del cauce. Después de esta confluencia,

Figura 1. Localización de la CRCV



Fuente: Guerrero de León (2012), con datos del programa IRIS 4.1 Proyecto de información básica (INEGI, 2005).

confluyen las aportaciones de los ríos Zapotlanejo y Calderón, los cuales llegan por la margen derecha del río Santiago. Finalmente, existen diversas aportaciones por ambas márgenes del río Santiago. La mayoría de las que se obtienen por la margen izquierda provienen de las descargas de agua residual de la ciudad de Guadalajara, de sitios como Tonalá, Coyula, San Gaspar de Las Flores, el arroyo Osorio, el arroyo San Andrés, entre otros,

hasta desembocar, por su margen derecha, al río Verde. Los cuerpos de agua superficiales de mayor importancia en la cuenca son los siguientes: la Presa del Ahogado, la presa Las Pintas, la Laguna de Cajititlán y las pequeñas represas Las Pintas, Las Pintitas, presa Ocotillo, presa El Cajón y la Presa las Rucias (véase la figura 4).

La formación geohidrológica de la cuenca se asemeja a una gran olla. En épocas de lluvias son frecuentes las inundaciones de las superficies más bajas; los desniveles favorecen la conducción de aguas pluviales y residuales hacia la Presa del Ahogado, que genera graves problemas de saneamiento.¹ La Laguna de Cajititlán, con un tamaño de 1563 hectáreas, es el segundo lacustre más importante después del Lago de Chapala. La contaminación del agua por residuos industriales y urbanos de la Laguna de Cajititlán afecta a los habitantes de Jocotepec y de Tlajomulco de Zúñiga. Las causas de esta contaminación han sido el aumento del desarrollo urbano, la venta de terrenos cerca de la laguna y la falta de tratamiento de aguas residuales, lo que ha conllevado una serie de problemas como inundaciones, pérdida de la biodiversidad acuática, disminución de la pesca y del valor paisajístico, todo lo cual la economía de los pobladores (Vázquez y Camacho, 1999; Apon-te, 2009).

Los acuíferos están sobreexplotados. En general, la demanda de agua en la cuenca ha provocado otro problema: la explotación de los acuíferos, principalmente el de Toluquilla, que actualmente tiene un déficit importante respecto de los de Atemajac y Cajititlán (CEA, 2022). Véase la tabla 1 en el que especifican las características de los acuíferos de la cuenca.

El paisaje que conforma la subcuenca está integrado por la región fisiográfica del Eje Neovolcánico Transversal, un complejo geomorfológico con una gran riqueza de biodiversidad. La densidad de la vegetación contribuye al alto grado de infiltración y escurrimiento del agua. En la cuenca alta del río Santiago, por ser una cuenca con características urbanas, prevalece la intervención humana sobre la vegetación, principalmente en el desarrollo de actividades pecuarias, agrícolas y de construcción de zonas habitacionales. Las actividades agrícolas se dan con mayor intensidad en municipios como Juanacatlán, Tlajomulco, Tonalá y Zapopan.

¹ Información obtenida mediante los recorridos de campo en la cuenca (septiembre de 2022).

Tabla 1. Condición de sobreexplotación de los acuíferos de la CRCV

Acuífero	Recarga media anual (Mm ³)*	Volumen concesionado/ asignado de aguas subterráneas (Mm ³)*	Déficit (Mm ³)*	Estatus	Municipios involucrados en la cuenca
Atemajac	147.3	133.09596	-11.50884	Sin disponibilidad	Zapopan, Guadalajara y Tonalá
Cajititlán	47.5	63.613569	-18.144598	Sin disponibilidad	Tlajomulco, Jocotepec, Ixtlahuacán, Juanacatlán
Toluquilla	49.1	119.625284	-73.095837	Sin disponibilidad	El Salto, Tlajomulco, Tonalá

* Mm³: millones de metros cúbicos.

Fuente: CEA (2022).

En la CRCV se identifican al menos tres áreas de conservación natural de gran importancia por la presencia de la biodiversidad reportada en la región, con servicios ambientales como la recarga hídrica, los sumideros de carbono y el paisajismo de El Bosque de la Primavera, Sierra Madroño y las Barrancas del río Santiago (Oblatos y Huentitán). La Barranca Huentitán y la Barranca Oblatos son formaciones geológicas creadas por el paso del río Santiago. Su extensión es de 15 000 hectáreas, con una longitud de 148 km y una anchura de 1 a 26 km. Tiene una altitud de 580 a 1 450 msnm y posee una vegetación formada por bosque de galería o ripario, bosque tropical caducifolio, bosque mixto quecus-pinus y vegetación secundaria. En la vegetación prevalece la familia y las especies Malvaceae (*Abutilum barrancae*) y Crasulaceae (*Echeveria plinglei*). También la especie *Sedum guadalajarum* y la especie endémica *Verbesina barrancae*. Se reconocen 946 especies de flora y 294 de vertebrados, de las cuales las aves encabezan la lista con 203 (Acevedo, 2008; Teresa, 2020).

Existen amenazas al ecosistema por proyectos urbanísticos del Gobierno Municipal de Guadalajara, por la agricultura y por los asentamientos humanos. El crecimiento urbano ha provocado la pérdida de la cubierta vegetal, debido a los asentamientos irregulares que se localizan, en algunas partes, hasta el borde de la barranca.

La población de los municipios y las localidades ubicados en la subcuenca, como Tlaquepaque, Tonalá, El Salto, Guadalajara, Zapopan, Chapala,

Jocotepec, Ixtlahuacán de los Membrillos, Juanacatlán, Tlajomulco de Zúñiga, es de 5 345 693 habitantes, es decir, 62.66% de la población total de Jalisco, el cual tiene 8 530 830 habitantes (INEGI, 2020). Los municipios con mayor aporte de población son Guadalajara, Tlaquepaque, Tonalá, Ixtlahuacán de los Membrillos, Tlajomulco y El Salto. Zapopan sólo aporta una pequeña cantidad de habitantes debido a que la cuenca representa un reducido porcentaje del territorio. Por otra parte, el grado de marginación de estos municipios es muy bajo (Conapo, 2020). Los indicadores sobre servicios de agua potable y drenaje de la subcuenca CRCV en general son mayores de 90%, aunque los municipios de Jocotepec, Juanacatlán, El Salto, Zapotlanejo y Tonalá padecen mayores deficiencias de esos servicios. Los usos de suelo en el territorio de la subcuenca en estudio son predominantemente urbanos, aunque los municipios de Chapala, Jocotepec, Ixtlahuacán de los Membrillos, Juanacatlán, Tlajomulco, Zapotlanejo y Zapopan tienen localidades rurales. El nivel de marginación en toda la región de la subcuenca es muy bajo de acuerdo con datos del Conapo (2020) (véase tabla 2).

Tabla 2. *Indicadores socioeconómicos: índice y grado de marginación*

<i>Municipio</i>	<i>Población total</i>	<i>Viviendas particulares habitadas</i>	<i>Ocupantes en viviendas con drenaje (porcentaje)</i>	<i>Ocupantes en viviendas con agua entubada (porcentaje)</i>	<i>Índice de marginación</i>
Chapala	55,196	16,305	99.5	99.2	59.008
Jocotepec	67,969	11,020	98.9	99.3	57.519
Ixtlahuacán de los Membrillos	47,105	19,702	99.6	99.7	58.184
Juanacatlán	727,750	8,698	99.5	99.6	59.707
Tlajomulco de Zúñiga	30,855	212,212	99.6	99.8	59.950
El Salto	232,852	59,073	97.8	99.4	58.638
Zapotlanejo	687,127	17,958	98.3	98.5	57.180
Tonalá	569,913	150,334	98.6	98.8	59.639
Tlaquepaque	1,476,491	185,080	98.8	99.1	60.090
Guadalajara	64,806	398,105	99.6	99.6	60.764
Zapopan	1,385,629	424,876	97.2	97.3	60.730

Fuente: INEGI (2020) y Conapo (2020).

La infraestructura de riego agrícola depende del Distrito de Riego 13 y de las unidades de riego de Ocotlán (11 módulos) y de Cajitlán (ocho módulos). El volumen de agua suministrado es errático, pues el promedio

del periodo es de 54.1 Mm³ por ciclo, aunque el volumen total anual varía entre 7.9 y 84.9 Mm³. Los módulos Las Pintas y Cajititlán son los más afectados por esta disponibilidad, ya que el primero no tuvo oferta de agua en cinco ciclos, y el segundo en tres de los ciclos del periodo. Por su parte, los módulos Canal de Atequiza y río Santiago son los de mayor consumo de agua, con un volumen anual promedio de 20.9 y 13.3 Mm³, respectivamente, los cuales representan 63% del total consumido por los módulos de riego en la zona de estudio. El cuadro 3 muestra la superficie de del Distrito de Riego 13 (CEAS 2004).

Tabla 3. Superficie de riego del Distrito de Riego 13

Módulo	Superficie de riego (hectáreas)			Usuarios (número de derechos)		
	Ejido	Pequeña propiedad	Total	Ejido	Pequeña propiedad	Total
Cuitzeo	614.52	1 416.69	2,031.21	179	266	445
Río Santiago	2,199.50	1 563.95	3,763.45	21	97	118
La Colonia	528.82	60.19	589.01	129	4	133
Chila	248.95	0.00	248.95	80	0	80
Canal Aurora	896.03	710.60	1,606.63	201	79	280
Canal Zapotlanejo	1,841.48	220.85	2,062.33	439	10	449
Canal Atequiza	2,684.43	2 203.00	4,887.43	574	266	840
Canal Las Pintas	596.75	151.10	747.85	170	18	188
Cajititlán	235.00	1 490.16	1,725.16	202	77	279
Totales	9 845.48	7 816.54	17 662.02	1 995	817	2 812

Fuente: CEAS/AyMA Ingeniería y Consultoría (2004).

El desarrollo económico de la zona metropolitana de Guadalajara está representado por las actividades industriales (56%), los servicios (31.3%) y el comercio (12%). El desarrollo inmobiliario y la industria de la construcción son prevaletentes debido al crecimiento urbano. Actualmente los municipios de Tonalá, El Salto y Tlajomulco tienen el mayor número de fraccionamientos autorizados. Los promotores inmobiliarios han sido, principalmente, Casas Geo, Ara y Homex. En estos grandes desarrollos pueden distinguirse claramente dos modelos: el abierto (como Miravalle, Ciudad Loma Dorada, El Sauz, Jardines del Valle, etc.) y el cerrado (Hacienda de Santa Fe y Hacienda Real). Muchos de estos fraccionamientos se establecieron en zonas de riego —como cauces de ríos—, como La Azucena o Galaxia Bonito Jalisco en El Salto, erigidos en los márgenes del río Santiago, además

de los fraccionamiento localizadas en el corredor industrial El Salto. En ambos casos estos fraccionamientos ponen en riesgo a los habitantes y provocan graves problemas de impacto ambiental (Guzmán *et al.*, 2010).

Por su parte, la industrial es la principal actividad de desarrollo económico de la región pero, a su vez, es la causante de los principales problemas ambientales. Existen tres grandes polos industriales bien definidos en Ocotlán: el corredor industrial que inicia en el Parque Industrial Guadalajara, el corredor El Salto y el corredor situado a lo largo del Anillo Periférico Sur del área metropolitana de Guadalajara. En la tabla 4 se describen algunas industrias según la Comisión Estatal del Agua, en 2005, pero es posible que en la actualidad haya más industrias o que algunas ya no existan. En este proceso de la investigación se sigue buscando información actualizada (CEA/AyMA Ingeniería y Consultoría, 2004).

Tabla 4. Descargas residuales industriales, volumen mayor a 80 m³/día

<i>Razón social</i>	<i>Municipio del titular</i>	<i>Actividad</i>	<i>Giro</i>	<i>Gasto (m3/d)</i>
Celanese Mexicana, S. A. de C. V.	Poncitlán	Fabricación de fibras sintéticas	Química-farmacéutica	3 024.00
Ciba-Geigy Mexicana, S. A. de C. V.	Ixtlahuacán de Los Membrillos	Fabricación de materias colorantes	Química-farmacéutica	2 056.30
IBM de México, S. A.	El Salto	Fabricación de artículos manufacturados	Otro	1 542.00
Compañía Nestlé, S. A. de C. V.	Ocotlán	Productos lácteos	Alimentos y bebidas	1 200.00
Industrias Ocotlán, S. A. de C. V.	Poncitlán	Industria textil	Textil	1 200.00
Harinera de Maíz de Jalisco, S. A.	Tlaquepaque	Fabricación de harina	Alimentos y bebidas	1 111.00
Nueva Nacional Textil Manuel del, S. A. de C. V.	El Salto	Industria textil y derivados	Textil	700.00
Fertilizantes Mexicanos, S. A.	Tlaquepaque	Fabricación de fertilizantes	Química-farmacéutica	682.00
Empaques de Cartón Titán, S. A. de C. V.	Tlaquepaque	Fabricación de papel	Celulosa, papel y madera	500.00
Empaques Modernos de Guadalajara, S. A. de C. V.	El Salto	Fabricación de papel	Celulosa, papel y madera	490.00
Los Camichines S.A. De C.V.	Zapotlanejo	Elaboración de tequila y mezcal	Tequileros	400.00
Hilasal Mexicana, S. A. de C. V.	El Salto	Textil	Textil	398.00

<i>Razón social</i>	<i>Municipio del titular</i>	<i>Actividad</i>	<i>Giro</i>	<i>Gasto (m3/d)</i>
Fábrica de Papel Jalisco, S. A. de C. V.	Tlajomulco De Zuñiga	Fabricación de papel	Celulosa, papel y madera	367.00
Balneario Agua Caliente, S. A.	Zapotlanejo	Centro recreativo	Servicios	312.43
Pemex Refinación	El Salto	Recepción y distribución de petróleo	Petróleo	279.59
Consortio Hogar, S. A. de C. V.	El Salto	Instalaciones de servicios	Servicios	274.00
Cytec, S. A. de C. V.	Ixtlahuacán De Los Membrillos	Fábrica de productos farmacéuticos	Química - farmacéutica	250.00
Industrias Petroquímicas Mexicanas, S. A. de C. V.	El Salto	Fabricación de hilos	Química - farmacéutica	241.40
Precitubo, S. A. de C. V.	El Salto	Fabricación de tubo de hierro	Metalmecánica	200.00
Quimi-Kao, S. A. de C. V.	El Salto	Productos químicos	Química - farmacéutica	200.00
Hima, S. A. de C. V.	El Salto	Acabados metálicos	Metalmecánica	188.00
Aceites Vegetales Finos, S. A. de C. V.	El Salto	Fabrica de aceites y margarina	Alimentos y bebidas	187.39
Envases Universales, S. A. de C. V.	El Salto	Fabricación de envases	Metalmecánica	171.80
Honda de México, S. A. de C. V.	El Salto	Fabricación partes automotrices	Automotriz y afines	150.00
Vibrantis, S. A. de C. V.	El Salto		Química-farmacéutica	150.00
Válvulas Urrea, S. A. de C. V.	El Salto	Fabricación de utensilios agrícolas	Metalmecánica	135.00
Aeropuerto y Servicios Auxiliares	Tlajomulco de Zúñiga	Servicios	Servicios	133.33
Servicios Estrella Azul de Occidente, S. A. de C. V.	Tlaquepaque	Lavandería	Servicios	120.00
Secretaría de Gobernación (Cefereso Número 2)	El Salto	Centro de readaptación social	Servicios	111.50
Nueva Nacional Textil Manuel del, S. A. de C. V.	El Salto	Industria textil y deriva	Textil	104.00
Urrea Herramientas Profesionales, S. A. de C. V.	El Salto	Fabricación de utensilios agrícolas	Metalmecánica	100.00
Roche Mexicana de Fármacos S. A. de C. V.	El Salto	Química-farmacéutica	Química-farmacéutica	100.00
Aeropuertos y Servicios Auxiliares	Tlajomulco de Zúñiga	Servicios	Servicios	100.00
Productos De Cola S.A. de C.V.	Chapala	Fabricación de cola y grenetina	Alimentos y bebidas	90.00
Locería Jalisciense, S. A. de C. V.	El Salto	Fabrica de vajillas y otros productos	Minerales no metálicos	90.00

<i>Razón social</i>	<i>Municipio del titular</i>	<i>Actividad</i>	<i>Giro</i>	<i>Gasto (m3/d)</i>
Agrofermex Industrial de Guadalajara, S. A. de C. V.	Tlaquepaque	Agroquímica	Química-farmacéutica	90.00
Industria de Repuestos, S. A.	El Salto	Fabricación partes automotrices	Automotriz y afines	89.20
Urrea Herramientas Profesionales, S. A. de C. V.	El Salto	Fabricación de utensilios agrícolas	Metalmecánica	88.00
Envases Generales Crown, S. A. de C. V.	El Salto	Fabrica de envases de aluminio	Metalmecánica	80.00
Secretaría de Gobernación (Cefereso Número 2)	El Salto	Centro de readaptación social	Servicios	80.00
Agro Industrias Exportadora, S. A. de C. V.	Tlajomulco de Zúñiga	Prep. cong. elab. conserv.	Alimentos y bebidas	79.40

Fuente: CEA/AyMA Ingeniería y Consultoría (2004).

El abastecimiento de agua al área metropolitana de Guadalajara, que proviene principalmente del Lago de Chapala, es de 4 093 hm³, lo que representa 51.8% de su capacidad. Otra importante fuente de abastecimiento es la Presa Calderón que se encuentra a 72% de su capacidad, aunque durante lo más grave de la sequía del año pasado llegó a tener 14%, lo que ocasionó la falta de agua en algunas colonias de la ciudad.² Asimismo, la Laguna Cajititlán es otra fuente de abastecimiento de agua para la subcuenca (SIAPA, 2020).

En tres años, el Gobierno de Jalisco ha invertido 1 660 millones de pesos para el saneamiento del río Santiago, pero los pobladores de El Salto y Juanacatlán no perciben avances significativos en ese saneamiento. Jalisco tiene 210 plantas de tratamiento de aguas residuales con una capacidad instalada para tratar más de 15 metros cúbicos de agua por segundo, por lo que llegan a tratar hasta 393 millones de metros cúbicos al año (CEA, 2022). Las instalaciones más importantes de la cuenca por el volumen de agua que tratan son las plantas de tratamiento El Ahogado y Aguaprieta (véase la tabla 5).

² Véase <http://www.informador.mx/jalisco/Lluvias-en-ZMG-Presa-Calderon-se-recupera-de-cri-sis-que-ocasiono-desabasto-de-agua-20220820-0081.html>.

Tabla 5. Aguas residuales tratadas en la cuenca CRCV

<i>Municipios</i>	<i>Planta de tratamiento</i>	<i>Gasto de diseño lps</i>	<i>Situación</i>
Chapala	Chapala	80	En operación
Jocotepec	Jocotepec	80	En operación
	San Juan Cosalá	20	En operación
	El Chante	9	En operación
	San Pedro Tesistan	3	Fuera de operación
	Las Trojes	2	Fuera de operación
	Potrerillos	3	Fuera de operación
	SanCristobal Zap	4	Fuera de operación
Ixtlahuacán de los Membrillos	Ixtlahuacán de los Membrillos	16	En operación
	Atequiza	45	En operación
	Rinconada de la Loma	8	Fuera de operación
	Los Olivos 2	25	Fuera de operación
	Los Girasoles	8	Fuera de operación
	Real del Lago	20	En operación
	Fraccionamiento La Huerta	10	Fuera de operación
	Fraccionamiento Valle Sabinos	40	Fuera de operación
	Residencial Capilla	9	En operación
	Juanacatlán	Juanacatlán	40
Ex Hacienda Zapotlanejo		2	Fuera de operación
Fraccionamiento Andalucía		20	Fuera de operación
Tlajomulco de Zúñiga	San Juan Evangelistas	12	En operación
	Santa Cruz de las Flores	100	En operación
	Tlajomulco de Zuñiga	180	En operación
	Cajititlán	32	En operación
	Fraccionamiento Arvento	65	En operación
	Palomar	8	En operación
	Club de Golf Santa Anita	10	En operación
	El Ahogado	2 250	En operación
	Fraccionamiento Los Agaves	10	En operación
El Salto	El Salto	32	En operación
	Fraccionamiento Parques del Triunfo	18	En operación
Zapotlanejo	Matatlán	3	Fuera de operación
	Zapotlanejo	73	Fuera de operación
	San Joaquín de los Zorrillos	3	En operación
	San José de las Flores	2	En operación
	La Laja	45	En operación
Tonalá	Fraccionamiento Colinas de Tonalá	52	En operación
	Fraccionamiento Urbi	10	En operación
	Fracionamiento Misión	22	En operación
	Acueducto	8	Fuera de operación
	Tonaya		
Tlaquepaque	-	-	-

<i>Municipios</i>	<i>Planta de tratamiento</i>	<i>Gasto de diseño lps</i>	<i>Situación</i>
Guadalajara	Parque la Solidaridad	60	En operación
	Zoológico	20	En operación
	Country Club	50	En operación
Zapopan	Rastro	5	En operación
	Nextipac 1	8	En operación
	Río Blanco	150	En operación
	San Miguel Tateposco	1	En operación
	Ciudad Bugambillas	30	En operación
	Club de Golf Las Cañadas	10	En operación
	Virreyes	20	En operación
	Agua Prieta	8 500	En operación
	La Venta del Astillero	29	Fuera de operación
	Parque Metropolitano	20	Operación
	Preparatoria	1	En construcción

Fuente: CEA (2022).

Descripción de los procesos históricos de gestión del agua en el río Santiago

Históricamente, el río Grande Santiago (o río Chicnahua) fue parte del desarrollo y fuente de vida para las poblaciones indígenas que se establecieron en esta zona. Por ejemplo, los pueblos más importantes —como Tonallan (Tonalá) y Tetlán— se alimentaban de peces del río Santiago (Tamayo-Fausto, 1992). El río Santiago y el río San Juan de Dios fueron fuentes de abastecimiento de agua a la llegada de los españoles a Guadalajara, en 1542, lo que provocó el incremento de la población y también la necesidad de conseguir mejores fuentes de agua. En 1730, Pedro Buzeta implementó importantes obras hidráulicas con el primer sistema de dotación de agua para la ciudad. Desde entonces, el río Santiago ha sido una importante zona de abastecimiento de agua, hasta el siglo xx. Durante muchos años, el río Santiago y su famosa caída de agua El Salto de Juanacatlán fueron conocidos en el ámbito nacional e internacional. Las poblaciones de la región basaban su economía en el turismo, practicaban la pesca, vendían alimentos a los turistas (Durand, 1992; y Arana-Cervantes, 1998).

En 1876 se instaló la fábrica de hilados Río Grande, la cual procuró aprovechar el caudal del río Santiago en la Hacienda Jesús María, cercana a la estación ferroviaria de El Castillo; con ello se fomentaba un modelo europeo basado en áreas industriales. Así se formó la colonia industrial El Salto.

El desarrollo económico de la región provocó que trabajadores de todo el país se movilaran y poblaran este incipiente municipio. En 1893 se instaló la primera planta hidroeléctrica en el país, aprovechando la caída de la cascada del río que se formaba entre los municipios de El Salto y Juanacatlán, lo cual permitió el abastecimiento de energía suficiente para iluminar las calles del primer cuadro de la ciudad de Guadalajara y, posteriormente, de otros municipios de Jalisco (Durán, 2003).

Figura 2. Cascada El Salto, en Juanacatlán, Jalisco en 1930



Fuente: INAH (2023).

En 1943 se fundó el municipio El Salto. En esa época en México se promovió el desarrollo hidráulico, el cual se centró en privilegiar la construcción de infraestructura y el aprovechamiento del agua, sin tomar en cuenta los efectos sobre el medio ambiente. La Secretaría de Recursos Hidráulicos fue la responsable de las políticas públicas en torno de ese recurso³ (Serna, 2013).

En la segunda mitad del siglo xx, en 1972, se promulgó la Ley Federal de Aguas para Prevenir y Controlar la Contaminación Ambiental. En esa

³ Su responsabilidad era la dirección, organización, control y aprovechamiento del recurso y la construcción de obras de riego, drenaje, agua potable y control de inundaciones.

época, el agua era sinónimo de la alianza con el sector agropecuario, misma que se plasmó en el plano organizacional con la fusión de las secretarías de Desarrollo Hidráulico y de Agricultura y Ganadería, que en 1976 dio origen a la Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos gracias al presidente José López Portillo y Pacheco. Con base en estas políticas hídricas centralistas se creó la Ley Orgánica de la Administración Pública Federal para unir la producción agrícola y los insumos necesarios, como el riego y la tenencia de la tierra. En 1988 se publicó la Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente, que a la fecha ha sido la base de la política ambiental del país. A partir del cambio en las políticas ambientales, el sector hídrico se fortaleció con la creación de la Comisión Nacional del Agua, en 1989, como autoridad federal en materia de administración del agua.

En Jalisco, el progreso económico se hizo evidente con la apertura del Programa de Parques y Ciudades Industriales que ya funcionaba en todo el país, propiciando que en Guadalajara se instalarán cuatro parques industriales en 1953.

En 1967 se instaló el Parque Industrial Guadalajara, ubicado en el municipio El Salto, conformado por grandes empresas como Celulosa y Derivados (química-textil), Polisac (plásticos), Aceros Industrial (metalmecánica), Champiñones de Guadalajara (alimenticia), Industrias Petroquímicas (petroquímica), Euzkadi (llantas), Maquiladora de Oleaginosas (aceitera), entre otras. Además, diversas empresas en diferentes municipios: Guadalajara, Zapopan y Tlaquepaque (Arias, 1992). En 1970 se inaugura el corredor industrial El Salto, el cual cambió significativamente las condiciones socioambientales de la región y promovió el desarrollo industrial; por lo tanto, cambió el uso de suelo, de agropecuario a industrial, cuyo mayor impacto tuvo lugar en la microcuenca El Ahogado, adonde llegaron empresas internacionales de giro electrónico y automotriz, como IBM, Honda e Hitachi.

En 1973 se reportó por primera vez la muerte de peces y ganado debido al agua contaminada del río Santiago, lo cual alarmó a la población y a las autoridades. Entonces comenzó a realizarse una serie de monitoreos de la calidad del agua. Los pobladores de la presa El Ahogado vieron disminuidas sus actividades agropecuarias como consecuencia de la pésima calidad de las aguas del arroyo El Ahogado. Por lo tanto, se cerró el área de recreación de las riberas del río Santiago y se eliminó el río como fuente de abasteci-

miento de agua para Juanacatlán (Durand, 1992). En 1984, el corredor industrial contaba con más de 70 industrias instaladas, de las cuales 44 vertían sus aguas residuales, directa o indirectamente, al río Santiago (Rodríguez y Cota, 2006). Debido a la creación de la Conagua se implementaron diseños políticos que promovían un nuevo modelo hídrico mediante procesos de gobernanza íntimamente asociados a una idea de buen gobierno.

Entre 2008 y 2020, después de la última reforma a la Ley de Aguas Nacionales (2008), se implementa la participación social a través del diseño de los consejos de cuencas, así como del fomento de la cultura del agua (artículo 13 bis, LAN). Después de que en el ámbito internacional ya se habían implementado modelos de gestión integral de recursos hídricos, el Estado mexicano comenzó a impulsar su propio modelo (Serna, 2013, y GWP, 2000).

El 2008 fue un año complejo, pues la problemática del río Santiago se agudizó porque, por una parte, la sociedad exigía al Gobierno el cumplimiento de la legislación ambiental en la cuenca del río Santiago y, por otra parte, el Gobierno implementó varias acciones que no fueron bien recibidas por la sociedad. Sin embargo, ese mismo año murió un niño por intoxicación de arsénico, que ingirió al caer al agua del río Santiago, en la colonia La Azucena, de El Salto, Jalisco. Este suceso indignó a las comunidades ribereñas, que desde hace varios años habían manifestado su preocupación por la contaminación del río, sus fétidos olores y las afectaciones a la salud de la población. Esta situación propició la formación de asociaciones de vecinos que luego conformaron asociaciones civiles como Grupo El Roble, Un Salto de Vida, Grupo Vida, etc. Es importante mencionar que los medios de comunicación nacional e internacional cubrieron ampliamente el tema, porque llenó de indignación el hecho de que los gobiernos y los empresarios minimizaron el problema (Guerrero-de León, 2012).

Desde entonces fue muy evidente la intervención de investigadores y académicos de algunas instituciones locales y nacionales, como el Centro de Investigación y Asistencia del Estado de Jalisco), la Universidad de Guadalajara, Microanálisis de Occidente, S. C., la Universidad Nacional Autónoma de México, la Universidad de San Luis Potosí, el iteso, por mencionar alguno. También fueron muy frecuente los estudios de la Comisión Estatal del Agua para monitorear el estado del recurso hídrico. Por ejemplo, Gallardo *et al.* (2005) identificaron la presencia de ácido sulfhídrico en la cascada

El Salto, así como de metales pesados como plomo, zinc y mercurio. Microanálisis de Occidente, S. C.,⁴ reportó valores fuera de la NOM-001-ECOL 1996. La Universidad de Guadalajara descubrió en la cascada de Juanacatlán la presencia de benceno, tolueno y p-Xileno, así como clorobenceno y 1,4 diclorobenceno (UdeG, 2004, y (Gallardo-Valdés, 2005). La Comisión Estatal del Agua también ha reportado la presencia de metales pesados y coliformes totales y fecales en varios sitios (CEAS/AyMA Ingeniería y Consultoría [2004] y CEA, 2023).⁵

Por su parte, la Secretaría de Salud de Jalisco realizó el estudio “Tamizaje de arsénico en las poblaciones de El Salto y Juanacatlán”, en el que reportó lo siguiente: “Los hallazgos señalaron que la población no tiene riesgo de exposición anormal a este compuesto”, refiriéndose al arsénico. La Comisión Federal para la Protección de Riesgos Sanitarios intervino en el municipio de Juanacatlán, el 23 de julio de 2008,⁶ acto del que derivó la iniciativa para aprobar la declaratoria de emergencia ambiental y de salud pública en los municipios de Juanacatlán y El Salto y solicitar la actuación interinstitucional para resolver el problema (Atilano, 2008, y Ramírez, 2008). Esto dio origen, en 2009, a una macrorecomendación de la Comisión Estatal de los Derechos Humanos de Jalisco. Desde entonces Comisión Estatal de Agua de Jalisco habilitó una página web a través de la cual informa sobre los resultados de los monitoreos de 13 puntos del río Santiago que analizan 47 parámetros relacionados con la inocuidad del agua.

⁴ Laboratorio certificado y acreditado por Entidad Mexicana de Acreditación, A. C. (oficio AG-016-008/04).

⁵ El marco de referencia para confrontar los valores de calidad del agua y la aptitud de los ríos para utilizarse como fuente de abastecimiento de agua potable, son los niveles máximos establecidos en los Criterios Ecológicos de Calidad del Agua. Estos criterios se publicaron en el *Diario Oficial de la Federación* en diciembre de 1989, mediante acuerdo de la Secretaría de Desarrollo Urbano y Ecología.

⁶ La información de la reunión de la Cofepri se obtuvo de la reunión que tuvo lugar en la casa ejidal de Juanacatlán el 23 de julio de 2008.

Figura 3. El río Santiago en el puente El Salto-Juanacatlán y la cascada con una gran cantidad de espuma



Fuente: Elaboración propia.

En la tabla 6 se resumen los procesos históricos de gestión que se han desarrollado en la región

Tabla 6. *Procesos históricos de gestión del agua en la subcuenca CRCV*

<i>Año</i>	<i>Eventos</i>
1876	Erección de la primera fábrica de hilados Río Grande
1893	Instalación de la planta hidroeléctrica
1940	Fundación de El Salto con fines industriales
1953	Instalación de cuatro parques industriales en Guadalajara
1960	Desarrollo de zonas industriales como González Gallo y El Álamo
1967	Instalación del Parque Industrial Guadalajara en el municipio de El Salto
1970	Apertura del corredor industrial El Salto
1973	Se reporta por primera vez la muerte de peces y de ganado por agua contaminada en el río Santiago
1980	Crecimiento urbano de El Salto y de la zona metropolitana de Guadalajara
1989	Creación del primer Consejo de Seguimiento y Evaluación del Acuerdo Chapala para atender los problemas del Lago de Chapala
1992	Declaración de Dublín, Conferencia Río de Janeiro. En México se crea la Ley de Aguas Nacionales y sus reformas hídricas institucionales
1993	Instalación del primer consejo de cuenca, el Consejo de Cuenca Lerma-Chapala, el 28 de enero
1998	Elaboración de un plan maestro para el rescate de la Cuenca Lerma-Chapala por la Conagua
1999	El 17 de julio se instala formalmente el Consejo de la Cuenca del río Santiago

<i>Año</i>	<i>Eventos</i>
2000-2001	Reglas de Organización y Funcionamiento de los Consejos de Cuenca. En 2001 se proyecta el Programa Nacional Hidráulico 2001-2006. Se realiza la primera denuncia pública debido a la problemática crítica del Lago de Chapala.
2003	Acuerdo para el Rescate y la Sustentabilidad de la Cuenca Lerma-Chapala. Denuncia ciudadana ante la Comisión de Cooperación Ambiental
2004	Propuesta del proyecto de construcción de la presa Arcediano con aguas del río Santiago y del río Verde para dotar de agua a la zona metropolitana de Guadalajara. La Universidad de Guadalajara no considera viable el proyecto Arcediano
2006	Oposición social a la construcción de la presa Arcediano. Mapder realiza movilizaciones sociales en Guadalajara y denunció el problema ante el Tribunal Latinoamericano (TLA)
2007	La Comisión Estatal del Agua propone la construcción de la megaplanta de tratamiento de aguas residuales en la cuenca El Ahogado. La OPS emite recomendaciones a la Comisión Estatal del Agua sobre la construcción de la presa Arcediano. Audiencia pública del TLA.
2008	Un niño muere accidentalmente al caer al río Santiago e ingerir sus aguas contaminadas. La CCA emite recomendaciones al Gobierno estatal y federal sobre la protección ambiental de la cuenca. El TLA emite recomendaciones al gobierno estatal y federal. Participación social activa, marchas y denuncias. La Secretaría de Salud de Jalisco evalúa los posibles riesgos a la salud por la contaminación por arsénico. La CONANP promueve la creación del área nacional protegida Barrancas de los ríos Santiago y Verde. Intervención de la Cofepris y del FIAN internacional
2009	La Comisión Estatal de Derechos Humanos de Jalisco emite la macrorrecomendación a los gobiernos estatales y municipales
2010	La Comisión Estatal del Agua firma un convenio con el Gobierno municipal de El Salto para la inspección de descargas de aguas residuales
2022	Proyecto Revive Río Santiago.
2022	La Comisión Estatal de Derechos Humanos de Jalisco vuelve a emitir una recomendación sobre el problema de la contaminación del río Santiago (recomendación 23/2022) a la Secretaría de Salud de Jalisco Proyectos de investigadores e instituciones para analizar la calidad del agua en la cuenca del río Santiago.

Fuente: Elaboración propia.

La necesidad de monitorear la calidad del agua en las comunidades del río Santiago ha propiciado que se involucren organizaciones sociales como el Instituto Mexicano para el Desarrollo Comunitario, así como Greenpeace, las cuales detectaron la presencia de enfermedades y el aumento de la mortalidad, con frecuencia alta e intermedia, en las zonas de Juanacatlán y El Salto, pero de manera especial en Ocotlán (Arellano-Aguilar, Ortega-Elorza, y Gesundheit-Montero, 2012). Hay algunos estudios, realizados en 2013, sobre el comportamiento de algunos indicadores de la calidad de agua en la cuenca El Ahogado, que determinaron que el agua es de mala calidad (Contreras-Dávila, 2013).

En 2022, la Comisión Estatal de Derechos Humanos de Jalisco emite la recomendación 23/2022 a la Secretaría de Salud de Jalisco y la apremia para que diseñe y ejecute una campaña informativa en los municipios por los que

atraviesa el río Santiago, para comunicar las señales y las medidas generales y preventivas que debe adoptar la población, así como para orientarla acerca de adónde recurrir para recibir atención médica en caso necesario. A la Comisión Estatal del Agua en Jalisco se le encomendó realizar más investigaciones, por lo menos en la zona de alto impacto de los contaminantes primarios presentes en el río Santiago y en el Lago de Chapala (CEDHJ, 2022).

La problemática socioambiental del río Santiago es resultado de las diversas fuentes de contaminación, principalmente de tipo antropogénico, y de las consecuencias que provoca, fundamentalmente en relación con las alteraciones al ecosistema y a la salud de las poblaciones ribereñas de toda la cuenca. La calidad del agua monitoreada desde 2008 hasta 2020 es muy deficiente porque los niveles de contaminación del agua del río Santiago evidencian daños severos del ecosistema, sobre todo en los municipios El Salto, en la presa El Ahogado y en el puente Cascada de Juanacatlán-El Salto. Los niveles de concentración de metales pesados, como níquel y zinc, se reportan ostensiblemente fuera de norma. Asimismo, la presencia de coliformes residuos fecales en la mayoría de los indicadores está fuera de esa normatividad.

En la subcuenca existe una problemática compleja debido principalmente a la dinámica económica y poblacional. Los problemas ambientales y sociales de la cuenca se describen en la tabla 7.

Actualmente, el monitoreo de la calidad de agua del río Santiago de la Comisión Estatal del Agua es una herramienta importante de información, pues detecta la alarmante la presencia bacteriana de coliformes totales y fecales y *E. coli.*, porque exceden los límites máximos permitidos (NOM-001-SEMARNAT-2021), entre 100 000 y 1 000 000 NMP/100ml en zonas como El Salto, Juanacatlán y El Ahogado. De igual manera, la presencia de metales pesados y de otros contaminantes, como plaguicidas y compuestos orgánicos volátiles, no está completamente documentada, pese a los graves riesgos para la salud que esto representa. Hay trabajos recientes de investigaciones detonadoras de acciones importantes, como el realizado por el doctor Felipe Lozano, de la Universidad de Guadalajara, que logró evidenciar la problemática de enfermedades renales en la localidad de Poncitlán, donde actualmente se construye un hospital especializado. Otro trabajo muy importante es el de la doctora Graciela Domínguez de la Universidad de San Luis Potosí, en el que con gran claridad muestra el riesgo sanitario en

Tabla 7. *Problemas socioambientales de la subcuenca*

<i>Priorización del problema</i>	<i>Problemas sociales</i>	<i>Problemas ambientales</i>
1	Riesgos para la salud por exposición al agua contaminada del río Santiago	Contaminación del río Santiago
2	Falta de agua potable en zonas periurbanas y rurales	Contaminación de cuerpos de agua en Cajititlán, presa El Ahogado y Lago Chapala
3	Falta de tratamiento de aguas residuales urbanas municipales	Sobreexplotación de acuíferos
4	Falta de tratamiento de aguas residuales industriales	Contaminación de acuíferos
5	Aumento del desarrollo urbano	Contaminación de aire y suelo
6	Falta de vigilancia y regulación de descargas de aguas residuales industriales	Inundaciones en zonas urbanas y agrícolas
7	Generación de basura y lixiviados de basurero Los Laureles	Cambios de uso de suelo
8	Falta de control de descargas agropecuarias en Ixtlahuacán de los Membrillos, Tlajomulco de Zúñiga y Zapotlanejo.	Deterioro de zonas de recarga hídrica en la Barranca río Santiago, en el Bosque El Madroño y en el Bosque la Primavera
9	Sobreconcesionamiento subterráneo para uso agrícola	Deterioro de ecosistemas ribereños
10	Baja eficiencia física en distritos de riego y Urderales	Deforestación de bosques

Fuente: Elaboración propia.

las poblaciones de Puente Grande, El Salto, Juanacatlán y El Salto, La Cofradía y Jardines de la Barranca en Guadalajara, donde la gente presentó altos índices de plomo, cadmio, arsénico, mercurio, benceno y compuestos orgánicos policíclicos, particularmente en los niños (Domínguez-Cortinas, 2011).

Como consecuencia de lo anterior, el actual Gobierno del Estado puso en marcha un proyecto denominado Revive Río Santiago, dirigido principalmente a eliminar el lirio en varios municipios ribereños como Juanacatlán, a habilitar algunos centros de salud, pero, principalmente, a ampliar la planta de tratamiento de El Ahogado, que en la actualidad tiene la capacidad de limpiar 2 250 litros por segundo de agua contaminada. Sin embargo, desde 2021 el gobernador de la entidad solicitó una reinversión de más de mil millones de pesos para ese proyecto.

Como ya lo apuntamos, el Gobierno de Jalisco ha invertido 1 660 millones de pesos para el saneamiento del río Santiago, pero los pobladores de la región afectada no perciben avances significativos en dicho saneamiento (Secretaría de Hacienda/Banobras, 2022). Por lo anterior, es impor-

tante evaluar el resultado de estas políticas locales de gestión del agua y cómo en su Consejo Académico del Agua y en su Consejo de Cuenca del Río Santiago se toman decisiones.

El agua es una variable esencial, integradora y fundamental para el desarrollo sostenible de la cuenca, por lo cual es necesario encontrar respuestas alternativas, convergentes y sistemáticas para hacer frente común al progresivo deterioro social, económico y ambiental de la región (Serna, 2013).

¿Qué metodologías debemos utilizar para proponer soluciones en las comunidades, relacionadas con los problemas de salud y con los riesgos ambientales? ¿Cómo lograr la convergencia institucional para atender las luchas de las comunidades para garantizar la inocuidad de los recursos que les sirven para sobrevivir desde hace muchos años?

Este proyecto forma parte de la primera etapa de análisis del proyecto Incidencia para la regeneración ecohidrológica y la reapropiación comunitaria de la Cuenca Alta del Río Grande de Santiago. No. 318965-FOPO1-2021-3. Colaboración UNAM-UdeG.

Bibliografía

- Acevedo, R. R., Hernández Galaviz, M., y Cházaro Basañez, M. (2008). Especies de plantas vasculares descritas de las barrancas aleñadas de la ciudad de Guadalajara y del Río Blanco Jalisco, México. *Polibotánica*, 26, 1-38.
- Amaya-Ventura, M. L. (2007). Importancia de las instituciones en la gestión del agua. *Ideas Concyteq*, 2(28), 704-12.
- Aponte-Carias, Y. (2009). Cambios de partidos, mismos problemas. *Gaceta Universitaria*. http://www.gaceta.udg.mx/Hemeroteca/paginas/566/G566_COT%207.pdf. 23 de marzo 2009.
- Arana-Cervantes, M. (1998). *Agua para todos: la lucha de una ciudad por apagar su sed*. Guadalajara: Sistema Intermunicipal del Agua Potable y Alcantarillado/Gobierno del Estado de Jalisco.
- Arellano-Aguilar, O., Ortega-Elorza, L., y Gesundheit-Montero, P. (2012). *Estudio de la contaminación del río Santiago y la salud pública en la región*. Ciudad de México: Greenpeace/Un Salto de Vida.
- Arias, P. (1992). La vida económica tapatía durante el siglo xx. En L. R. García, *Capítulos de historia de la ciudad de Guadalajara* (p. 250). Guadalajara, Jalisco: Ayuntamiento de Guadalajara.

- Atilano, A. (2008). Presenta Salud estudio. Descartan arsénico en vecinos. Concluyen estudios en los habitantes de El Salto y Juanacatlán no tienen alta exposición al metal. *Diario Mural*, p. 1.
- Biswas, A. (2001). Los consejos de cuenca en México. Publicación del Centro del Tercer Mundo para el Manejo del Agua, A. C. www.thirworldcentre.org.
- Brown, R. M. (1973). Water Quality Index. Application of de Kansas River Basin. *46th Conference Wather Poll. Fed.* Cleveland, Ohio.
- CEA. (2012). *Resultados del monitoreo, río Santiago, río Zula y arroyo del Ahogado, julio 2012*. Guadalajara, Jalisco: Comisión Estatal del Agua en Jalisco.
- . (2018). Comisión Estatal del Agua. Acuíferos. Disponibilidad media anual de aguas subterráneas en acuíferos del Estado de Jalisco de acuerdo con lo publicado en el *Diario Oficial de la Federación*, 4 de enero. Recuperado de <https://www.ceajalisco.gob.mx/contenido/acuíferos/>.
- . (2022). Comisión Estatal del Agua. Inventario estatal de plantas de tratamiento de aguas residuales. Recuperado de https://www.ceajalisco.gob.mx/doc/Actualizaci%C3%B3n_MARZO2022.pdf.
- . (2023). Comisión Estatal del Agua. Cuencas hidrológicas en Jalisco. Recuperado de https://www.ceajalisco.gob.mx/contenido/cuencas_jalisco/img/Cuencas%20Hidrologicas%20en%20Jalisco.pdf.
- CEAS/AyMA Ingeniería y Consultoría. (2004). *Resumen ejecutivo, inventario y balance de masa de fuentes de contaminación del río Santiago*. Guadalajara, Jalisco: Comisión Estatal de Agua y Saneamiento/AyMA Ingeniería y Consultoría.
- CEDHJ. (2009). Comisión Estatal de Derechos Humanos del Estado de Jalisco. *Recomendación 01/2009*. Guadalajara, Jalisco: CEDHJ.
- . (2022). Comisión Estatal de Derechos Humanos en Jalisco. *Recomendación 23/2022*. Guadalajara, Jalisco: CEDHJ.
- CIATEJ. (2013). Centro de Investigación y Asistencia en Tecnología y Diseño del Estado de Jalisco. *Plan estratégico del polígono de fragilidad ambiental de la Cuenca del Ahogado*. Guadalajara, Jalisco: Gobierno del Estado de Jalisco/CIATEJ.
- Conagua. (2018). *Estadísticas del agua en México*. Ciudad de México, México: Semarnat.
- Conapo. (2020). Consejo Nacional de Población. Índice de marginación por entidad federativa y municipio Recuperado de https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/835462/Indices_Coleccion_280623_entymun-p_ginas-154-411.pdf.
- Contreras-Dávila, C. A.-A.-R.-O.-S.-L. (2013). Análisis del polígono de fragilidad ambiental dentro del polígono de fragilidad ambiental cuenca El Ahogado. *IWA México* (p. 2). San Luis Potosí: IWA.
- Dinus, S. H. (1987). *Desing of the Wather Quality Index*. Oregon: W. R. Bullentin.
- Domínguez-Cortinas, G. (2011). *Propuesta metodológica para la implementación de una batería de indicadores para la salud que favorezcan el establecimiento de programas de diagnóstico, intervención y vigilancia epidemiológica en las poblaciones ubicadas en la influencia del proyecto de...* Guadalajara, Jalisco: Comisión Estatal del Agua de Jalisco/Universidad Autónoma de San Luis Potosí.
- Diario Oficial de la Federación*. (1983). Decreto por el que se reforma y adiciona el artícu-

- lo 115 de la Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos. Recuperado de https://dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=4794121&fecha=03/02/1983#gsc.tab=0.
- Duran, J. M. (2003). Crisis ambiental en el Lago de Chapala y el abastecimiento para Guadalajara. *Revista E-Gnosis*, 1(6), 1-13.
- Durand, J. J. (1992). La vida económica tapatía durante el siglo XIX. En L. R. García, *Capítulos de historia de la ciudad de Guadalajara*. Tomo II. Guadalajara, Jalisco: Ayuntamiento de Guadalajara, Colección Guadalajara 450 años.
- Dourojeanni, A., y Jouravlev, A. (2001). *Crisis de la gobernabilidad en la gestión del agua. Desafíos que enfrenta la implementación de las recomendaciones contenidas en el capítulo 18 del Programa 21, Recursos Naturales e Infraestructura Naciones Unidas*. Chile: CEPAL.
- Gallardo-Valdés, J. (2005). *Estudio ambiental del ácido sulfhídrico como contaminante del aire en las comunidades de Juanacatlán y El Salto, Jalisco 2004-2005*. Guadalajara: Universidad de Guadalajara, tesis de maestría en ciencias de la salud ambiental.
- Guerrero-de León, A. A. (2012). *Análisis de los procesos de gobernanza en las cuencas del río Santiago y río Ayuquila en Jalisco*. Autlán, Jalisco, México: Universidad de Guadalajara.
- Gutiérrez J., W. R. (2004). Biodicación de la calidad del agua con macroinvertebrados acuáticos en la sabana de Bogotá, utilizando redes neuronales artificiales. *Lomnología*, 26(1), 151-160.
- Guzmán, M., Peniche, S., Michel, J., y Peña, L. (2010). El impacto ambiental y social de las obras hidráulicas en el río Santiago, Jalisco-Nayarit, México. En S. Peniche, E. Macías, F. González y M. Guzmán. *Primer Seminario Internacional sobre la Cuenca del Río Santiago* (pp. 73-91). México: PIFI.
- GWP. (Integrated Water Resources Management) (2000). *Integrated Water Resources Management. Tac Background Paper No. 4*. Editado por Global Water Partnership, Suecia.
- IMTA-CNA. (2008). *Diagnóstico de la contaminación del río Santiago*. Ciudad de México, México: Intituto Mexicano de Tecnología del Agua.
- INAH. (2023). Instituto Nacional de Antropología e Historia. Mediateca. Cascada El Salto en Juanacatlán, Jalisco en 1930. Recuperado en. <https://mediateca.inah.gob.mx/repositorio/islandora/object/fotografia%3A454547>.
- INEGI. (2020a). Censo de Población y Vivienda. Número de habitantes. Jalisco. Recuperado en <https://cuentame.inegi.org.mx/monografias/informacion/jal/poblacion/>.
- . (2020b). Censo de Población y Vivienda. Consulta interactiva de datos. Recuperado de https://www.inegi.org.mx/sistemas/olap/consulta/general_ver4/MDXQueryDatos.asp?proy.
- Isah Aba, S. Q.-V. (2020). Implementation of Data Intelligence Model Coupled with Ensemble machine learning for Prediction of Water Quality Index. *Environmental Science and Pollution Research*, 27, 41524-41539.
- Kittinger, C. M.-S. (2013). Evaluación de la calidad del agua de un río centroeuropeo:

- ¿cubre la Directiva 2000/60/CE todas las necesidades de una clasificación completa? *Sci. Total Med.* Recuperado de <http://lunazul.ucaldas.edu.co/index.php/english-version/91-coleccion-articulos-espanol/275-calidad-bacteriologica-del-agua-de-los-rios>.
- Ley Federal de Derechos. (2014). *Disposiciones aplicables en materia de aguas nacionales*. Ciudad de México: Semarnat/Conagua.
- M, B.-M., y Montaño-Salazar R., H.-S. J. (2017). *Situación ambiental de la cuenca río Santiago* Guadalajara/Ciudad de México, México: Semarnat.
- Machuca, N. J. A. (1989). Florística y ecología de la vegetación fanerogámica de la región septentrional de Jocotepec, Jalisco. Guadalajara: Jalisco: Universidad de Guadalajara, tesis profesional de agronomía.
- Maass, J. M. (2003). Principios generales sobre manejo de ecosistemas (pp. 117-136). En E. Sánchez, Vega-Peña, E. Peters y O. Monroy-Vilchis. *Conservación de ecosistemas templados de montaña*. México: INE/U.S. Fish and Wildlife Service, Ford Foundation.
- Mussetta, P. (2009). Participación y gobernanza. El modelo de gobierno del agua en México. *Revista Espacios Públicos*, 5(25), 66-84.
- NOM-001-Semarnat-2021, aue establece los límites permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en cuerpos receptores propiedad de la nación. *Diario Oficial de la Federación*. México: Semarnat.
- Ramírez, Y. J. (26 de julio de 2008). Juanacatlán y El Salto con más cáncer: Cofepris. Diputados federales buscan declaratoria de emergencia en la zona. *Diario el Público*, p. 5.
- Rodríguez, B. J., y Cota, Y. (2006). Desarrollo del Parque Industrial El Salto, Jalisco. *Cuadernos Prolam/USP*, 2, 83-104.
- Rodríguez, O., Herrera-Fonseca, M., Sánchez-Jácome, M. D. R., Álvarez, I., Valenzuela, R., García, J., y Guzmán-Dávalos, L. (2010). Catálogo de la microbiota del bosque La Primavera, Jalisco. *Revista Mexicana de Micología*, 32, 29-40.
- Rosa-Portillo, D. L. (2014). *Análisis espacio temporal del monitoreo de la calidad del agua del río Grande Santiago y sus implicaciones en la salud ambiental*. Zapopan, México: Universidad de Guadalajara.
- Secretaría de Hacienda/Banobras. (2022). *Proyectos México Oportunidad de inversión*. Recuperado de https://www.proyectosmexico.gob.mx/proyecto_inversion/0912-ampliacion-de-la-ptar-el-ahogado/.
- Teresa, N. R. A. (2020). Variación en la estructura, composición y diversidad del Bosque Tropical Caducifolio en las Barrancas de la Cuenca del Río Santiago, México.
- Semarnat. (2000). Programa de Manejo del Área de Protección de Flora y Fauna Bosque La Primavera. México: Semarnat/CONANP.
- Serna, R. (2013). Jiménez, Blanca, Torregrosa, María Luisa, y Aboites Aguilar, Luis (eds.). El agua en México: cauces y encauces. *Agua y Territorio = Water and Landscape*, (2), 128-129.
- Sistema Intermunicipal de Agua Potable y Alcantarillado. (s. f.). Fuentes de abastecimiento de agua potable en el área metropolitana de Guadalajara. Recuperado de https://www.siapa.gob.mx/sites/default/files/8.-_informe_actividades_siapa_agosto_2021.pdf.

- Spring, Ú. O., Manzur, M. C. T., Hernández, F. S., Moreno, T. H., y Ramírez, A. C. (2011). *Los retos de la investigación del agua en México* (No. 333.91 R4).
- Rzedowski, J., y McVaugh, R. (1966). La vegetación de Nueva Galicia. *Contributions from the University of Michigan Herbarium*, 9(9): 1-123.
- Tamayo-Fausto, M. (1992). *Nuño de Guzmán* (vol. 1). Ciudad de México, México: Siglo XXI.
- TLA. (2007). Tribunal Latinoamericano del Agua. *Veredicto de la audiencia pública regional, México. Caso: Afectación de la Cuenca Lerma-Chapala-Santiago-Pacífico. Estado de México, Querétaro, Guanajuato, Aguascalientes, Durango, Michoacán, Jalisco, Nayarit*. México: TLA.
- UdeG. (14 de Junio de 2004). Universidad de Guadalajara firme en sus conclusiones sobre Arcediano. *Gaceta U WWFB (World Water Forum Bulletin)* 2006. A Summary Report of the 4th World Water Forum. Published by the International Institute for Sustainable Development (IISD) in Collaboration with the 4th World Water Forum Secretariat 82(15), 1-19. Recuperado de <http://www.iisd.ca/ymb/worldwater4/universitaria>.
- Vázquez, L. J. A., y Camacho, R. A. (1999). Ictiofauna de la laguna de Cajititlan. Resúmenes del XV Congreso Nacional de Zoología y VII Reunión Nacional de Malacología y Conquiliología del 9 al 12 de noviembre. Tepic, Nayarit.

VI. La electromovilidad como estrategia del desarrollo urbano sostenible. ¿Es el automóvil eléctrico un medio de transporte democrático y sostenible en las ciudades mexicanas?

DANIEL ISAAC JIMÉNEZ SÁNCHEZ*

DOI: <https://doi.org/10.52501/cc.178.06>

Resumen

En 2015, los líderes mundiales adoptaron un nuevo compromiso que incluía objetivos globales para erradicar la pobreza, proteger el planeta y asegurar la prosperidad para todos como parte de una nueva agenda de desarrollo sostenible. El séptimo objetivo busca que la energía sea asequible y no contaminante. Se propusieron que de aquí a 2030 se aumente considerablemente la proporción de energías renovables. El objetivo undécimo, denominado *ciudades y comunidades sostenibles*, prioriza en una de sus metas que, para 2030, las ciudades proporcionen acceso a sistemas de transporte seguros, asequibles, accesibles y sostenibles. En esta investigación se realizó un análisis, económico, social y ambiental del actual sistema de movilidad urbana sostenible. El eje del debate se centra en el cambio tecnológico del automóvil convencional de motor de combustión interna a uno de motor eléctrico y en cómo este último se ha convertido en la estrategia que se ha de seguir para reducir considerablemente los estragos ambientales del actual sistema de transporte convencional. La investigación trata de dar respuesta a la siguiente pregunta: ¿Realmente el automóvil eléctrico garantizará el cumplimiento de los objetivos de desarrollo sostenible (ODS)? La conclusión del análisis describe que, al menos en México, el uso del automóvil eléctrico no es democrático y sólo ha aumentado las brechas de las desigualdades sociales;

* Doctorante en Ciudad, Territorio y Universidad de Guadalajara, México. ORCID: <https://orcid.org/0009-0004-7651-4312>

sin embargo, para cumplir los compromisos de los ODS, la estrategia de la electromovilidad está bien encaminada; sólo se debe cambiar el enfoque a una visión más general y menos individual, es decir, a un modelo de transporte público eléctrico.

Palabras clave: *Electromovilidad, movilidad sostenible, desarrollo urbano sostenible.*

El desarrollo sostenible

Es del conocimiento general que el planeta se encuentra en un punto de colapso ambiental por la contaminación debida al desarrollo económico impulsado desde la primera revolución industrial y hasta nuestros días, principalmente por el consumo de recursos energéticos de origen fósil. La emisión de carbono ha alterado los balances de energía que mantienen el orden de los factores bióticos y abióticos, a causa del calentamiento global y cambio climático. La preocupación a nivel mundial alertó a las naciones y fue así que en 1983 el secretario de la Organización de las Naciones Unidas (ONU) encomienda a Harlem Brundtland que establezca y presida una comisión especial e independiente para atender la crisis socioambiental. En 1987 se presenta ante la ONU el informe de la Comisión Mundial sobre el Medio Ambiente y el Desarrollo, titulado *Nuestro futuro común*, donde el concepto de desarrollo sostenible o sustentable tiene su génesis. A partir de este momento nacen el concepto y la disciplina que buscan desacelerar, por medio de agendas y compromisos, el deterioro ambiental y social del desarrollo económico.

A finales del siglo pasado surge el concepto más importante para el siglo XXI: *desarrollo sostenible*, entendido como el desarrollo que permite satisfacer las necesidades de las generaciones presentes sin comprometer las posibilidades de las del futuro para satisfacer las suyas. Esto por medio de tres dimensiones o tres pilares del desarrollo: el económico, el social y el ambiental (CEPAL, 2019). La sustentabilidad como concepto o disciplina para contextualizar la necesidad de cambiar las conductas que afectan el equilibrio natural es relativamente nueva; sin embargo, las afectaciones a

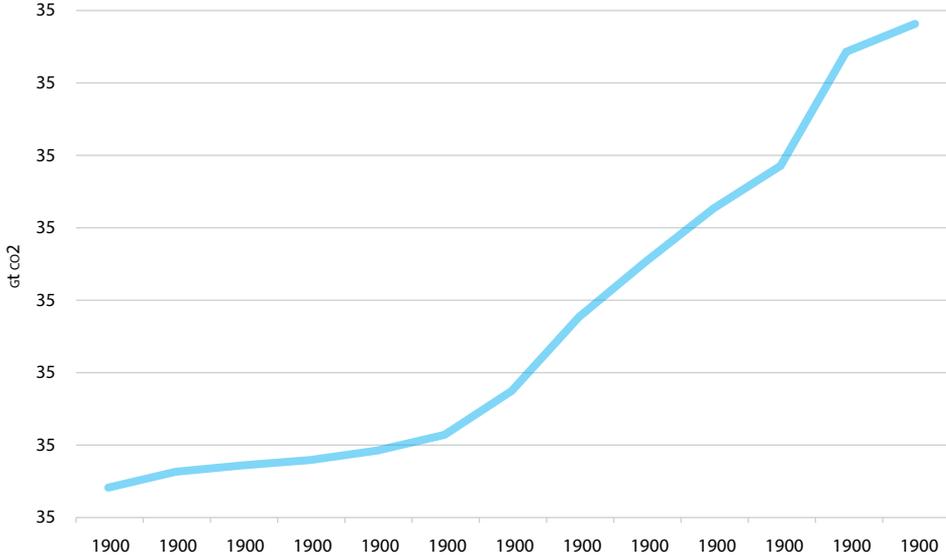
los ecosistemas naturales por causa de las actividades antropogénicas prácticamente han existido desde que el humano habita el planeta, sólo que su impacto no era significativo.

La última década del siglo pasado debe quedar marcada en los anales de la historia moderna de la humanidad, porque fue el inicio de una etapa en que por primera vez a nivel mundial las naciones se habían comprometido a hacer un esfuerzo especial por centrarse en el impacto de las actividades socioeconómicas sobre el medio ambiente. La cumbre de Río de 1992, llamada La Cumbre para la Tierra, fue esencial para plantear los objetivos del desarrollo sostenible. Esta conferencia, entre otros planteamientos, reconoció que la integración y el equilibrio de las preocupaciones económicas, sociales y medioambientales requería nuevas percepciones sobre la forma en que producimos y consumimos, la forma en que vivimos y trabajamos y la forma en que tomamos decisiones (ONU, 1992).

El siglo XXI inició con muchos objetivos en aras de la sustentabilidad, pero no sólo a nivel global, presidida por las cumbres sobre el medio ambiente, pues estas metas por cumplir también exigían compromisos a nivel nacional, regional, local y personal. Se extendió un amplio debate a nivel gubernamental y académico, que continúa hasta el presente, sobre cómo organizar el desarrollo sostenible, especialmente cuando las condiciones socioeconómicas son diferentes en todas las escalas mundiales. El 25 de septiembre de 2015 los líderes mundiales adoptaron en conjunto 17 ODS para erradicar la pobreza, proteger el planeta y asegurar la prosperidad para todos como parte de una nueva agenda de desarrollo sostenible, con metas específicas que deben alcanzarse en los próximos años, para 2030.

Después de 2015, los ODS se volvieron guía a nivel mundial sobre la manera en que toda actividad humana debía regirse para asegurar el cumplimiento con el acuerdo de la sustentabilidad desde los sectores público y privado e inclusive de manera personal. De los 17 objetivos globales, cada uno aborda un tema concreto; además, cada uno contiene metas específicas para cumplir. Los ODS abarcan desde temas sociales hasta ambientales, como la erradicación de la pobreza, hambre cero, educación, ciudades sostenibles, energías limpias y cuidado del ambiente. Todos los ODS tienen la misma importancia, pero, en materia de cambio climático y desarrollo urbano sostenible, los objetivos 7 y 11 concentran la mayor atención (ONU, 2015).

Gráfica 1. El cambio anual en las emisiones globales de $gtco_2$ de la quema de energía y procesos industriales, 1900-2020



Fuente: Elaboración propia con datos de EIA (2023).

El objetivo 7, denominado “Energía asequible y no contaminante”, busca que la energía se democratice y más personas en países pobres tengan acceso a ella, en la medida en que ésta cambia hacia fuentes no contaminantes, pues 13% de la población mundial aún no tiene acceso a servicios modernos de electricidad. En términos ambientales, la energía es el factor que contribuye principalmente al cambio climático y representa alrededor de 60% de todas las emisiones mundiales de gases de efecto invernadero (ONU, 2015).

El objetivo 11 lleva por título “Ciudades y comunidades sostenibles” y busca que los asentamientos humanos sean óptimos para la vida de las personas por igual. Actualmente en el planeta más de 60% de las personas habita en ciudades y se espera que la cifra aumente a 2030, a pesar que las ciudades del mundo ocupan sólo 3% de la tierra; no obstante, son responsables de entre 60 y 80% del consumo de energía y de 75% de las emisiones de carbono. Además, existe un gran número de personas que habitan en áreas marginadas con alto grado de pobreza, sin acceso a servicios básicos, como el agua o el transporte (ONU, 2015).

El vínculo energético entre automóvil y petróleo

La energía tiene un vínculo estrecho con el humano. Desde la Antigüedad, el hombre ha empleado su ingenio para construir medios que le permitan usar la energía disponible en la naturaleza, desde aplicaciones caloríficas y lumínicas hasta medios que le permitan trasladarse de un lugar a otro, ya sea con ayuda de la fuerza animal¹ o de las fuerzas naturales, como las corrientes de viento o agua² (Mumford, 1971), pero al no ser éstas una energía continua, con desventajas espaciales y temporales,³ esto ha orillado al humano a buscar otras formas de energía, dóciles, manejables y atemporales.

Con el afán de dominar la oscuridad en un mundo cada vez más dinámico por la entrada de la Revolución Industrial, se empezó a intensificar el aceite de ballena como combustible para iluminar. La ballena, la yubarta y el cachalote conformaron la industria que satisfizo las necesidades lumínicas desde el siglo XI hasta el siglo XIX (WWF, 2009) junto con el uso del carbón, aunque este último material fue aprovechado de mejor manera por su poder calorífico para mover las grandes máquinas a vapor desde 1769. El carbón desde el siglo XIX se consolidó como la principal base energética del mundo, la cual permitió impulsar el ferrocarril durante el inicio de la Revolución Industrial hasta mediados del siglo XX, reemplazado por el petróleo.

Se sabe que el petróleo ya era conocido por antiguas civilizaciones, pero no fue hasta 1859 que se extrajo de pozos perforados con fines energéticos⁴ (Mumford, 1971), para posteriormente convertirse en la principal base ener-

¹ El caballo fue uno de los animales más usado como medio de fuerza para el transporte. A finales del siglo XVII sólo en Alemania el número de equinos utilizados para el transporte se estimaba en 40 000 (Braudel, 1983, p. 349).

² La rueda hidráulica había sido usada por los egipcios para elevar agua y quizás por los sumerios para otros fines. Seguramente durante la era cristiana los molinos de agua se habían hecho bastante comunes en Roma. El molino de viento, por su parte, es proveniente de Persia en el siglo VIII (Mumford, 1971, p. 127).

³ La energía directa de la naturaleza, ya sea mediante el sol, viento o agua, no está presente en todas las latitudes del planeta y también puede variar en el tiempo (es temporal).

⁴ El petróleo ya era conocido y utilizado por las antiguas civilizaciones para usos medicinales y prácticos, como lubricante, pero no fue hasta 1859 que se extrajo de pozos perforados para su uso a gran escala (Mumford, 1971, p. 255)

gética del mundo hasta nuestros días.⁵ Gracias a sus características químicas, enlaces de moléculas de hidrógeno y carbono, principales elementos de la combustión (Ortuño, 2009), y por ser liviano (Mumford, 1971), acumulable y transportable, ganó mayor utilidad y versatilidad. Sus primeras aplicaciones estaban más relacionadas con sus propiedades caloríficas y lumínicas, pero, a medida que su transformación permitió que fuera empleado en otros medios de transformación energética, su utilidad se aceleró.

Después de años de desarrollo y perfección de diferentes tecnologías, el motor de combustión interna (y específicamente su adaptación al automóvil) había encontrado en los combustibles derivados del petróleo una fuente de energía inmejorable (Ladd, 2008). Para ese entonces el motor a vapor, cuyo combustible era el carbón, fungía como la principal fuente de movimiento y su aplicación a carros estaba en una etapa temprana,⁶ pero no pudo competir con el motor de combustión interna y los combustibles derivados del petróleo, pues dicho motor no necesitaba suministro constante y su construcción era posible en aplicaciones más pequeñas (Mumford, 1971).

Los combustibles derivados del petróleo crearon una alianza energética con el automóvil, que desplazó otros medios de transporte y otras fuentes de energía. Mumford (1971) describe: “el automóvil, la energía y el movimiento ya no estaban encadenados a las vías del ferrocarril: con un vehículo se podía viajar tan rápido como un tren” (p. 256). Gracias a la energía del petróleo y al vehículo, el movimiento ahora era privado y estaba disponible cuando se necesitaba.

El automóvil y el motor a combustión siguen reinando en los medios de transporte hasta la actualidad; sin embargo, a finales del siglo pasado se empezó a reconocer que su uso ha dejado en las urbes secuelas ambientales y sociales que son difíciles de remediar a corto y mediano plazo, y para tales efectos es necesario un cambio de fuente energética que minimice los impactos y así migre hacia un modelo de movilidad sostenible.

⁵ Se estima que los productos del petróleo y del gas natural representan más del 65% de suministro de energía del mundo (Ortuño, 2009, p. 46).

⁶ El primer automóvil se construyó alrededor de 1771 y fue fabricado por el ingeniero francés Cugnot. Consistía en un triciclo con un motor a vapor con dos cilindros (Cernuschi, 2005, p. 14).

La democratización del automóvil en las ciudades y sus consecuencias socioambientales

El movimiento es parte esencial de las relaciones socioeconómicas de una urbe; para tales fines se necesita de medios de transporte para el desarrollo de las diferentes actividades productivas y reproductivas. Desde esta mirada el movimiento es el elemento vertebral del modelo urbano moderno, porque, a medida que las ciudades han crecido, de igual modo se han incrementado las distancias; por consiguiente, el transporte es el único medio que permite reducir el tiempo en los viajes.

Sin la posibilidad de movimiento, la gran urbanización de las ciudades hubiese fracasado desde el principio (siglo xx); por ejemplo, en Nueva York el primer sistema de transporte en satisfacer la movilidad de los habitantes periféricos fue el tranvía (Hall, 1996). Londres ya planteaba la construcción de un sistema de transporte interurbano (metro, tren y tranvía) para satisfacer las necesidades de movimiento de los habitantes de distritos del casco urbano londinense, tanto para traslados cortos como largos (Hall, 1996).

A medida que las ciudades del mundo fueron creciendo, las dinámicas de movimiento se aceleraron; los habitantes necesitaban trasladarse de la manera más autónoma y rápida posible. Después de años de desarrollo y perfección de diferentes tecnologías, el automóvil de combustión interna había llegado al mercado. Este sistema de transporte tenía reputación de ser más rápido, seguro y confiable y, a pesar de que aún no existían las condiciones para su uso (infraestructura), esto no implicó que su aplicación al uso privado fuera un éxito (Ladd, 2008). Con este nuevo sistema de transporte, desde la década de 1920, los tranvías y ferrocarriles perdieron clientes en favor del automóvil. Las zonas que abandonaron fueron ocupadas por las nuevas autopistas (Hall, 1996). A partir de dicha invención es difícil imaginar una ciudad sin este tipo de transporte (Jaffe y Koning, 2016).

Henry Ford es reconocido por ser el fabricante de autos que revolucionó la industria automotriz al optimizar los procesos y bajar los costos en los precios de los automóviles. En gran medida este avance permitió, primeramente, en los Estados Unidos la democratización en el uso del automóvil, que posteriormente llegaría al resto de los países, con sus respectivas excep-

ciones. Y, a medida que el automóvil estuvo disponible económicamente para las masas gracias a la producción en serie de Henry Ford (Hall, 1996), ganó terreno como un sistema de transporte confiable, veloz, seguro y flexible que generalmente exceden a los ofrecidos por el transporte público (Woldeamanuel *et al.*, 2009).

El automóvil se ha convertido en un medio de transporte democrático. Autores como Castells (1978) expresan que “el automóvil habría formado la megalópolis, después del tranvía, que fundamentaría las grandes aglomeraciones industriales” (p. 230). Sheller (2011) refiere el uso del automóvil como una etapa de urbanización masiva, recalcando el papel que este medio de transporte tiene como agente de expansión de las urbes contemporáneas. Después de la llegada del automóvil se dio inicio a una reestructuración de la morfología urbana con la construcción de grandes redes de carreteras y autopistas que dominaron el paisaje construido (Sheller, 2011). Cervero (1998) recalca que, desde la aparición del automóvil, la mayoría de las intervenciones que se generan en la infraestructura urbana buscan reducir las distancias y congestionamientos a los usuarios.

Bajo esta línea de pensamiento, y con una creciente motorización en las urbes, el urbanismo moderno sembró sus bases principalmente en la construcción de redes carreteras, con el fin de brindar mejores condiciones de movimiento a los habitantes cada vez más autodependientes (Gehl, 2014). La planificación de las ciudades estuvo dominada por una generación de analistas de tráfico; sus estudios parecían demostrar que inexorablemente había que construir grandes tramas de autopistas urbanas para poder absorber el creciente tráfico (Hall, 1996).

Desde hace medio siglo el automóvil funge como principal medio de transporte y fuente de emisión de una gran cantidad de bióxido de carbono (CO_2), principal causante del cambio climático (Rascón, 2012). También hay que considerar que la industria automovilística requiere de grandes cantidades de energía, directa o indirectamente; por ejemplo, la producción de una unidad requiere de dos toneladas equivalentes de petróleo y numerosas cantidades de productos industriales, como acero, aluminio, caucho, pintura, vidrio y plástico. De igual manera, para su fabricación se requiere energía y se emiten contaminantes. Es un costo que el medio ambiente debe adsorber (Santamarta, 2002).

Durante la vida útil de un automóvil se generan residuos de aceites y gasolinas, responsables de la contaminación del suelo y agua, y cuando éste llega a su fin, se necesita una superficie en donde se guardará, esperando algún día ser reutilizado. Mientras esto sucede los materiales⁷ usados para su construcción seguirán contaminando el suelo y agua. Por si fuera poco, se estima que las deposiciones ácidas de cada auto causan la muerte de tres árboles y dañan seriamente a otros treinta (Santamarta, 2002).

No se puede negar que la motorización modifica los balances de energía. El resultado de estos componentes ha dejado una huella ecológica en las urbes, que todos debemos pagar sin importar si somos o no usuarios del “anhelado automóvil” (Sheller, 2011).

El uso del automóvil se ha centrado en suprimir estructuras sociales, como la escala pedestre,⁸ y aumentar los problemas de salud relacionados con el sedentarismo (Gehl, 2014). Se ha calculado que el coche acorta en promedio la vida en 820 horas, debido a accidentes mortales de tráfico; según las estadísticas, uno de cada cien conductores morirá en accidentes de tránsito (Santamarta, 2002).

En resumen, el uso del automóvil en las ciudades ha demostrado ser perjudicioso y no contribuye al desarrollo urbano sostenible. Cervero (1998) expone una lista muy clara de los problemas locales y globales de los que los críticos han señalado como culpable a la cultura automovilística, que se repite de manera homogénea en las diferentes escalas urbanas:

- Las muertes prematuras por accidentes
- La contaminación del aire
- El desarraigo de los barrios urbanos
- El aislamiento social y la segregación de clases
- El agotamiento de los combustibles fósiles
- El cambio climático
- La contaminación acústica

⁷ Los materiales son cadmio, plomo, cobre, cromo, níquel, zinc y PCB (Santamarta, 2002, p. 106).

⁸ La escala pedestre, también conocida como escala barrial, se refiere a la morfología urbana que permite al habitante caminar para acceder a cualquier bien o servicio.

- La explotación de las economías del tercer mundo (para satisfacer el consumo del primer mundo y las demandas energéticas) (Cervero, 1998, p. 26)

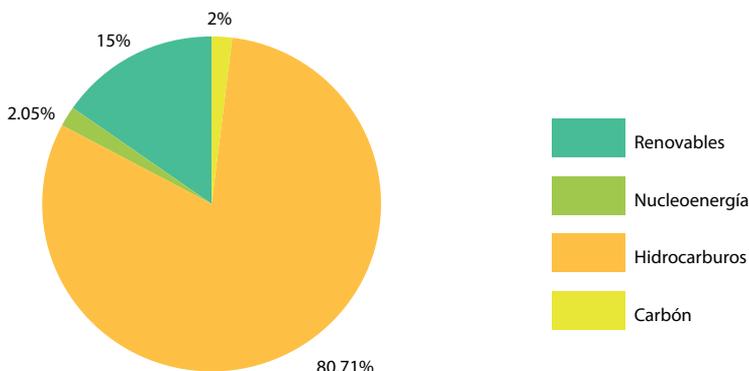
La energía eléctrica obtenida de fuentes renovables ha dado esperanzas hacia un futuro menos contaminado y más sano. El automóvil eléctrico se postula como el medio de transporte que en un futuro cambiará los efectos negativos del actual vehículo. En este sentido, la industria automotriz sigue siendo una de las más fuertes económicamente a nivel mundial y todas las empresas del ramo tratan de migrar hacia ese futuro, cambiando la base energética del automóvil, es decir, están siendo parte de una transición energética a nivel mundial. Sin embargo, existe un debate entre científicos respecto a si el mundo está preparado para una transición energética y si la electromovilidad es el camino correcto que se debe seguir.

La transición energética y electromovilidad en México

De acuerdo a los compromisos que México ha adoptado ante la ONU durante el acuerdo de París sobre cambio climático, el Gobierno estableció como meta reducir 22% de los gases de efecto invernadero (GEI) para 2030 de manera no condicionada, o bien reducir 36% de los GEI, condicionando la meta a contar con financiamiento y transferencia tecnológica. En los mismos términos, México busca reducir 51% de carbono negro de manera no condicionada y 70% en forma condicionada (Semantart, 2015). Para cumplir tales compromisos, se necesita aumentar la producción de energía de fuentes renovables al mismo tiempo que decrecer el uso de combustibles de origen fósil.

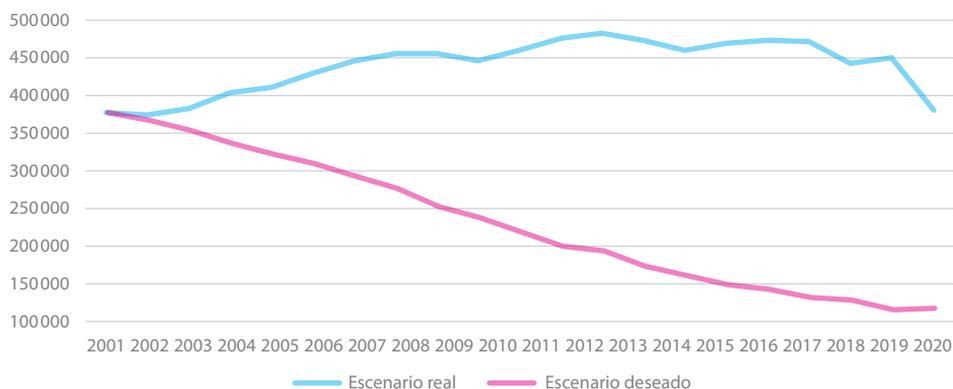
De acuerdo con el último balance nacional de energía 2022 (SENER, 2023), la estructura de la producción primaria de energía sigue dominada por fuentes no renovables: el petróleo crudo tiene mayor proporción, con un 50% el gas natural, con 22%, y las renovables sólo con 15%. A mitad del plazo para cumplir con los compromisos internacionales, el modelo energético del país sigue dominado por la energía más contaminante.

Gráfica 2. Estructura de la producción de energía primaria, 2022



Fuente: Elaboración propia con datos de SENER (2023).

En términos absolutos, se puede observar que la meta del país para reducir la contaminación no ha sido suficiente; además, en la Ley General de Cambio Climático (LGCC) se estableció reducir 30% las emisiones para 2020 y 50% para 2050 en relación con las emitidas en el año 2000. En el año 2000, el país emitió alrededor de 397 968 kt de CO_2 ; en 2020 se redujeron a 383 131 kt de CO_2 (Banco Mundial, 2023), pero dicha reducción se debió a la llegada de la pandemia de COVID-19 y no tanto a las acciones gubernamentales por reducir la producción de CO_2 . Como se muestra en la figura 3, existe un abismo enorme entre el escenario deseado y el real.

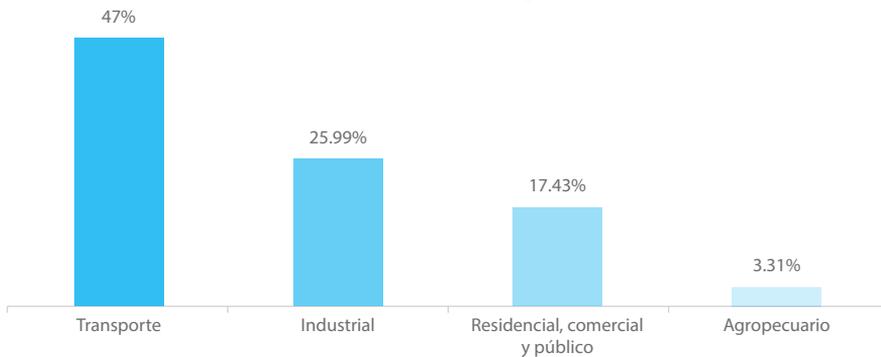
Gráfica 3. Emisiones de CO_2 (kt) para México de 2000 a 2020

Fuente: Elaboración propia con datos del Banco Mundial (2023).

Estrictamente, México como país no ha cumplido sus propias metas en materia de cambio climático. De no ser por la pandemia de 2020, el número de emisiones hubiese superado los 500 000 Mt CO₂ de acuerdo con la tendencia manifestada en años anteriores. Por otra parte, los compromisos a nivel mundial para 2030 se ven difíciles de lograr a medida que la base energética siga predominada por los combustibles fósiles.

De los sectores socioeconómicos en el país a 2022, el sector transporte fue el que más energía consumió, con 47% del total, seguido del sector industrial y residencial, con 25 y 17% respectivamente. Estos últimos dos sectores demandaron tanto energía eléctrica como energía fósil, caso contrario al sector transporte, de cuya base más de 99% depende de los combustibles fósiles, es decir, existe una relación mayor entre consumo de energía y emisiones del sector transporte que del resto de los sectores.

Gráfica 4. Consumo final total de energía para México, 2022



Fuente: Elaboración propia con datos de SENER (2023).

En el sector transporte, el combustible con mayor demanda dentro del consumo final fue la gasolina, con 64%, seguida del diésel, con 25%. Gasolina y diésel abarcaron 89% del consumo final, mientras que la electricidad sólo representó 0.2% (SENER, 2022). El sector transporte, al ser el de mayor demanda energética y con mayor dependencia hacia la energía no renovable, contribuye con mayor magnitud a las emisiones de carbono y, por consiguiente, al cambio climático; en este sentido, si el país desea cumplir con sus compromisos, debe bajar el consumo de gasolina y diésel al mismo tiempo que incentiva el uso de la electricidad.

Para ello no sólo se necesita una transición energética, sino también una transición tecnológica. Primero se debe cambiar de vehículos de combustión interna a vehículos eléctricos y, posteriormente, realizar una transición energética. Lo mejor sería que ambas cosas sucedieran al mismo tiempo; sin embargo, los datos nos dan muestra de una realidad distinta. De acuerdo con datos del INEGI (2023), en 2022 se vendieron al público 1 094 713 vehículos a motor de combustión, mientras que de vehículos eléctricos sólo se vendieron 5 631 unidades, lo que sólo representa 0.5% de las ventas. Para garantizar una electromovilidad más democrática, se debe aumentar la proporción de vehículos eléctricos en el mercado.

Pero el cambio tecnológico no resulta tan fácil en términos económicos. El primer obstáculo para la democratización de la electromovilidad está asociado principalmente con el costo de los vehículos. De acuerdo con el precio al público de las agencias automotrices, el auto eléctrico más económico ronda los \$450 000 en comparación con el más económico de los motores a gasolina, que cuesta \$220 000. Aunque en los últimos años el precio del vehículo eléctrico ha bajado considerablemente, no es competitivo con los autos tradicionales.

Aunque los vehículos eléctricos estuvieran a la par en precios o por ley se descontinuaran los motores a combustión y el mercado estuviera absorbido por motores eléctricos, ¿qué beneficios habría? Desde luego, por un lado, habría una disminución en la concentración de carbono, las ciudades estarían menos contaminadas y se mejoraría la salud pública en cuanto a problemas respiratorios; no obstante, por otro lado, habría la misma o mayor cantidad de autos en las ciudades, se tendrían los mismos niveles de congestión y se seguirían necesitando recursos públicos para ampliar y construir más vías y espacios para estacionamiento y centros de recargas de energía para los autos eléctricos.

En términos del desarrollo sostenible, no se cumpliría con todos los objetivos. El objetivo “Energía asequible y no contaminante” se cumpliría a medias: habría una mayor demanda para la energía no contaminante; sin embargo, al igual que ahora, existiría una gran mayoría de personas que no tendrían los recursos para adquirir un vehículo eléctrico y, por consiguiente, no tendrían acceso al sistema de transporte privado. El objetivo “Ciudades y comunidades sostenibles” distaría mucho de lograrse, porque la tran-

sición energética no garantiza una disminución del consumo de la misma. Las ciudades seguirían representando entre 60 y 80% del consumo de energía. Y, mientras el enfoque girase en torno al automóvil eléctrico, las personas que habitan en áreas marginadas con alto grado de pobreza seguirían sin acceso a sistemas de transporte. En términos del desarrollo sostenible, no se cumpliría con todos los objetivos.

Se podría concluir que la electromovilidad es necesaria para minimizar el impacto que actualmente tienen las ciudades por la quema de combustibles fósiles; pese a esto, el enfoque del automóvil eléctrico no sería democrático y sostenible, como la industria automotriz lo describe. Se tendría un desarrollo económico que sólo beneficiaría a unos cuantos, como hasta ahora. Su alto valor en el mercado excluiría a una gran mayoría de personas de poder adquirir la tecnología y a la larga seguiría causando los mismos problemas de congestión y contaminación por la producción y eliminación, cuando la vida útil de sus componentes termine.

En esta orden de ideas la electromovilidad no es mala; al contrario, ésta se debe centrar en impulsar y mejorar el transporte público. Este medio en verdad es democrático y sus beneficios son verdaderamente sostenibles, incluyentes, accesibles y asequibles para toda población. Si los recursos públicos que se invierten para construir, ampliar y reparar la infraestructura de la automovilidad se invirtieran en mejorar y transitar energéticamente al transporte público hacia la electromovilidad, entonces sí, la electromovilidad sería una estrategia del desarrollo urbano sostenible y democrática.

Bibliografía

- Banco Mundial. (23 de mayo de 2023). *Emisiones de CO2 (kt) - Mexico*. Obtenido de <https://datos.bancomundial.org/indicador/EN.ATM.CO2E.KT?end=2019&locations=MX&start=2000>
- Braudel, F. (1983). *The Wheels of Commerce*. New York: Book Club Associates.
- Castells, M. (1978). *La cuestión urbana*. Barcelona: Siglo XXI de España editores.
- CEPAL. (2019). *Acerca de Desarrollo Sostenible*. Recuperado el 30 de marzo de 2022, de comisión Económica para América Latina y el Caribe: <https://www.cepal.org/es/temas/desarrollo-sostenible/acerca-desarrollo-sostenible#:~:text=La%20g%C3%A9nesis%20del%20concepto%20de,la%20Asamblea%20General%20en%201983>.
- Cernuschi, E. (2005). *Cuatro siglos en cuatro ruedas*. Montevideo: IDEJO.

- Cervero, R. (1998). *The Transit Metropolis : A Global Inquiry*. Washington, D.C: Island Press.
- EIA. (10 de abril de 2023). *Global Energy Review: CO2 Emissions in 2021*. Obtenido de <https://www.iea.org/reports/global-energy-review-co2-emissions-in-2021-2>
- Gehl, J. (2014). *Ciudades para la gente*. Buenos Aires: Infinito.
- Hall, P. (1996). *Ciudades del mañana, historia del urbanismo en el siglo XX*. España: Ediciones del Serbal.
- INEGI. (2023). *Vehículos de motor registrados en circulación*. Obtenido de http://www.inegi.org.mx/lib/olap/consulta/general_ver4/MDXQueryDatos.asp?#Regreso&c=13158
- Jaffe, R., y Koning, A. (2016). *Introducing Urban Anthropology*. London and New York: Routledge.
- Ladd, B. (2008). *Autophobia Love and Hate in the Automotive Age*. Chicago: University of Chicago.
- Mumford, L. (1971). *The City in the History*. (E. Revol, Trad.) New York: Houghton Mifflin Harcourt.
- ONU. (1992). *Conferencia de las Naciones Unidas sobre Medio Ambiente y Desarrollo*. Rio de Janeiro: ONU.
- . (30 de abril de 2015). *Objetivos del Desarrollo Sostenible*. Obtenido de <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/cities/>
- Ortuño, S. (2009). *El mundo del petróleo : Origen, usos y escenarios*. México, D.F.: Fondo de Cultura Económica.
- Rascón Chávez, O. (2012). Estado actual, perspectiva e impactos en el medio ambiente del transporte de México. En G. C. Delgado Raos, *Transporte, ciudad y cambio climático* (págs. 65-102). Ciudad de México: UNAM.
- Santamarta, J. (2002). *El automóvil devora la ciudad*. Barcelona: Boletín CF+S 28.
- Semarnat. (26 de noviembre de 2015). *México en la Conferencia de las Partes - COP21*. Obtenido de <https://www.gob.mx/semarnat/articulos/mexico-en-la-conferencia-de-las-partes-cop21#:~:text=Reducir%20el%2022%25%20de%20los,el%2070%25%20en%20forma%20condicionada>.
- SENER. (2023). *Balance nacional de energía 2022*. Ciudad de México: Gobierno de México.
- Sheller, M. (2011). Sustainable Mobility and Mobility Justice: Towards a Twin Transition. En M. Grieco, y J. Urry, *Mobilities: new perspectives on transport and society* (págs. 289-304). London: Ashgate publishing limited .
- Woldeamanuel, M., Cyganski, R., Schulz, A., y Justen, A. (2009). Variation of households' car ownership across time: application of a panel data model. *Springer Science+Business Media*, 371-387.
- WWF. (2009). *La historia de la caza de ballenas y de la comisión ballenera internacional*. Madrid: WWF.

VII. Esquemas de producción de ladrillo rojo con menor huella de carbono

ALEJANDRO GARZA GALICIA*

DOI: <https://doi.org/10.52501/cc.178.07>

Resumen

En México, la producción de ladrillo rojo es uno de los procesos artesanales que ha impulsado la economía de diferentes grupos marginados, a partir de esta actividad se apoya el desarrollo de la industria de la construcción residencial; sin embargo, ha traído consigo la generación de grandes cantidades de emisiones contaminantes, lo que ha provocado una significativa huella de carbono que, al mismo tiempo, ha generado un problema toxicológico por la cantidad de enfermedades en la población dedicada a este sector. Es necesario evaluar el proceso físico y químico para el horneado de ladrillo e identificar las condiciones para mejorar una combustión con menor cantidad de emisiones, utilizando los principios de la ingeniería de procesos, las posibilidades de la utilización de la energía solar y la introducción de los sistemas de control e instrumentación, a fin de establecer los medios biológicos para disminuir los impactos ambientales y de salud. De esta forma el presente trabajo realiza un análisis de la química de la combustión y los procesos de transferencia de calor llevados a cabo en la elaboración del ladrillo, un monitoreo de los productos de la combustión de un horno tradicional y la utilización de esquemas energéticos híbridos sustentables en un nuevo diseño de horno ecológico, lo cual daría como resultado una instalación que produce un ladrillo de alta resistencia y una huella de carbón

* Doctor en Agua y Energía. Universidad del Valle de Atemajac, campus Guadalajara, México. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0404-4986>

menor que un horno tradicional al tiempo que se conservan los esquemas tradicionales de esta industria.

Palabras clave: *Combustión, balance energético, huella de carbono, cambio climático.*

Introducción

A lo largo de la historia del sector de la construcción se identifican grandes avances en diferentes frentes. Los materiales han visto una revolución para hacerlos más ligeros, resistentes y tenaces. Se observa que existe una gran cantidad de perfiles de acero para viguetas de soporte, que permiten movimientos en dos o tres ejes sin afectar la firmeza de la loza; otro avance sustancial son las paredes de yeso, que son muy utilizadas en interiores para hacer habitaciones, cubículos, oficinas, hasta baños, ya que permiten pegar azulejo. Los procedimientos de construcción se han revolucionado para colar las losas con trompo y bombeo, lo cual reduce los tiempos para irrigar el concreto. No hay que olvidarse de mencionar los aditivos para fraguar más rápido, bajo lluvia o inclusive bajo el mar. Esta área de la ingeniería se ha visto beneficiada por toda una serie de mecanismos, como mencionan atinadamente Solminihac y Thenoux (2011).

Esto nos lleva a este nuevo panorama sobre la industria de la construcción, pasando por los cimientos, estructuras dinámicas contra sismos, materiales cerámicos para aumentar la resistencia y la maquinaria disponible. Sin duda, vemos en nuestros días grandes y pequeñas edificaciones que nos permiten conocer el alcance que han logrado la ingeniería de materiales y los procesos constructivos para eficientar, en todos los sentidos, la gran industria de la construcción; sin embargo, uno de los elementos constructivos más importantes en la historia sigue sin experimentar la revolución que llegó a casi todos los elementos constructivos. Efectivamente se habla del ladrillo rojo, el clásico que se compraba en la tienda de materiales junto con yeso, cal, cemento gris y un castillo y que sigue igual, sin un cambio que permita a los arquitectos o especialistas en construcción aprovechar todas sus características y, al mismo tiempo, fortalecer este sector.

Al hablar de procesos de elaboración de ladrillo rojo, se habla de una empresa tradicionalista, un sector que por décadas ha sido desarrollada por familias enteras, desde niños hasta los abuelos, grupos muy integrados para la elaboración y la cocción en hornos. Los procesos son manuales, están desarrollados con las únicas herramientas de sus manos, como se ve en la figura 1. Estas familias fabricantes del ladrillo heredan el oficio de generación en generación. Los esquemas con los cuales elaboran su producto han sido transmitidos por sus antecesores y están poco abiertos a cambiar la forma de fabricarlo, a pesar de que hay mucha maquinaria en el mercado o a pesar de padecer enfermedades por respirar las emisiones contaminantes de las quemas en el horno.

Figura 1. *Proceso manual de fabricación de ladrillo rojo*



Fuente: Parque Ladrillero Tlajomulco (2017).

La cadena de suministro es muy básica en este sector: materiales como la arcilla, barro y leña son suministrados por miembros de la misma comunidad. Para el caso de la venta de las cargas de ladrillo generalmente se trata de venta al menudeo y en la vía pública. De esta forma esta industria le da trabajo a miles de personas, por lo que representa un porcentaje en la

economía de los Estados; en cierta manera se mantiene como una actividad productiva y significativa para muchos de ellos. Sin embargo, estos procesos rudimentarios han hecho que la productividad depende de la capacidad de la persona que está mezclando la arcilla y el barro con el agua para posteriormente troquelar con un arnés antes de cargar el horno. En esta parte el operador acomoda los ladrillos crudos para dejar canales para acomodar la leña, madera o aserrín en el mejor de los casos. Al terminar el acomodo, se dejan bocas para iniciar la quema y suministrar aire a la combustión. Al ser tan rudimentario el proceso, hay mermas: ladrillos que no alcanzan la tonalidad rojiza que los caracteriza o que han quedado quebradizos y no sirven. El control de calidad se da por observación, considerando que el rojo encendido cumple con las características de resistencia a la compresión y tensión. Después de tres a cinco días el producto se encuentra listo para que lleguen los transportistas con sus cargadores para acomodar los ladrillos en las plataformas (Averardo, 2009).

Particularmente, esta industria al ser muy artesanal carece de muchos de los avances de la ingeniería de procesos, sobre todo del control ambiental, ya que se quema generalmente leña, madera, aserrín y desafortunadamente basura de todo tipo. Esto la vuelve una de las industrias más contaminantes y complejas en su control por parte de las autoridades (Romo, Cervera y Córdova, 2004). Las emisiones a la atmósfera incluyen partículas de hollín, monóxido de carbono (CO), bióxido de carbono (CO₂) y compuestos muy agresivos al medio ambiente, como los óxidos de nitrógeno (NO_x) y las dioxinas, por lo que en estos grupos son frecuentes enfermedades respiratorias crónicas e inclusive el cáncer. Al ser industrias carentes de normatividad en límites de emisión de contaminantes a la atmósfera, no hay instalaciones susceptibles de restricciones, por lo que operan sin limitantes, salvo contingencias que las autoridades indican. En Jalisco y Guanajuato se han promovido normas para la elección del sitio de instalación (Semadet, 2018). En el caso de Guanajuato la norma indica las especificaciones que debe tener el horno (NTE-IEG-001, 1998). Desafortunadamente las normas son poco atendidas, por lo que se trabaja sin limitación en sitios inclusive muy cercanos a zonas habitacionales.

En los diferentes análisis que se han hecho acerca de esta industria, se enmarcan las problemáticas de una falta de elementos de ingeniería. Hay

instalaciones muy contaminantes y con baja disponibilidad para cambios en los procesos; en este sentido, al no ser cuantificada la huella de carbón de las ladrilleras, no se puede tener certeza de las emisiones globales, las cuales contribuyen al calentamiento global, a las afectaciones al medio ambiente y sobre todo a la salud de los propios gremios y de los habitantes que rodean estos lugares (ONU, 2015).

Evaluando las condiciones del tipo de industria, sobre todo de la problemática ambiental y toxicológica, se desarrolla el presente trabajo involucrando a los productores en el diseño de un horno que cumpla con los requerimientos de operación y, al mismo tiempo, acercando los elementos de la ingeniería de procesos y control ambiental.

Desarrollo

Para determinar el diseño de un nuevo horno, primeramente se analizó la situación actual de la industria ladrillera, las condiciones en que las personas laboran, los procesos que realizan, los esquemas operativos —desde el suministro de las materias primas, hasta el cargado de camiones, considerando las cantidades que producen—, los tiempos de elaboración y cocimiento, los mercados hacia donde se dirigen, las asignaciones de los trabajadores en turnos y los horarios.

Para conocer la problemática, se investigaron en diferentes fuentes bibliográficas los esquemas en los cuales se habían evaluado los hornos y las circunstancias que los rodean. Se encontró que existen antecedentes de estudios y valoraciones técnicas y sociales a estos grupos; sin embargo, poco fue el alcance para lograr algún cambio significativo en las operaciones (Romo, Cervera y Córdova, 2004). Considerando el objetivo del presente trabajo enfocado al análisis de la huella de carbón, se planteó la propuesta de medir el flujo de emisiones de contaminantes con un monitoreo a un horno tradicional, para tener la referencia de qué tipo de gases y en qué cantidad se están produciendo, como se observa en la figura 2.

Figura 2. Monitoreo de gases de la combustión ladrillera en Tlajomulco



Fuente: Elaboración propia.

Los métodos y técnicas utilizadas no están normalizados debido a que se trata una combustión abierta y una fuente fija, por lo que se optó por identificar diferentes puntos para medir las concentraciones, así como realizar adaptaciones para que los analizadores pudieran medir concentraciones tan altas. Los registros se indican en la tabla siguiente.

Tabla 1. Registro de monitoreo a horno tradicional de ladrillo

Contaminante	Concentración (ppm)	Norma (ppm)	Referencia	Observación
Monóxido de carbono (co)	1875	500	Fuente fija a combustible fósil	Se rebasa norma de referencia
Bióxido de carbono (co ₂)	843	20	Fuente móvil a gasolina	Se rebasa norma de referencia
Compuestos de azufre S	1403	2200	Fuente fija a combustible fósil	Se rebasa norma de referencia
Partículas	820	450	Fuente fija a combustible fósil	Se rebasa norma de referencia

Fuente: Elaboración propia.

Tanto la norma NAE-Semadet-002/2018 como la NTE-IEG-001/98 sólo indican características de ubicación y combustibles por utilizar. Desafortunadamente queda a criterio lo que utiliza como combustible el productor, por lo que vuelve más complejo estandarizar la medición a otros hornos por el tamaño y la configuración. Se tendría que monitorear cada horno para saber qué cantidad de contaminantes se está emitiendo a la atmósfera, lo que vuelve muy complejo determinar la huella de este sector y, sobre todo,

tener un control más estricto sobre las quemas y los periodos en los cuales deben hacerse, aunado a que muchos de estos hornos están fuera de supervisión por la lejanía en donde se construyen.

Al evaluar las concentraciones, se obtuvo de manera indirecta la huella de carbono con base en las metodologías de Espíndola y Valderrama (2012) y los factores del Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC, 2014). Se obtuvo que

$$\text{Huella} = 840 \text{ KgCO}_2 \text{equiv}$$

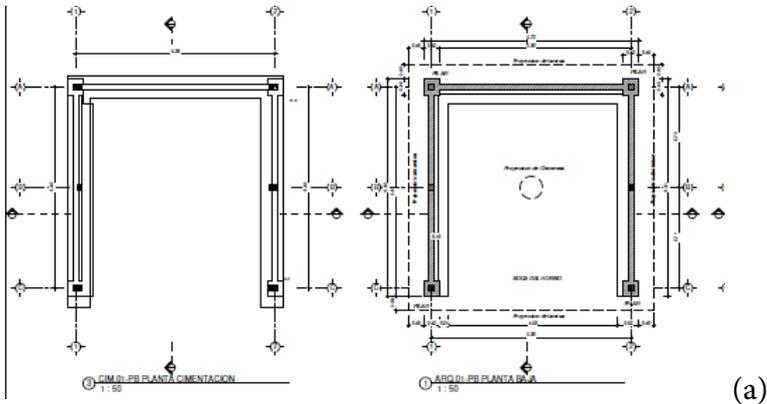
Esto significa que cerca de una tonelada de gases de efecto invernadero son vertidos a la atmósfera en la producción de ladrillo en un horno tradicional con cargas aproximadas de 20 000 unidades. Al analizar el proceso, identificamos que es un horno sin geometría. No existen aislamientos, por lo que la pérdida de calor en las paredes y en superficie es elevada al registrarse temperaturas de hasta 600 °C en su perímetro. Como no hay una geometría definida, los tiros de inyección de aire no generan succión por convección natural (Márquez, 1989). Otro aspecto importante es que la leña se coloca en los tiros de acuerdo con su tamaño, lo cual indica que en algunos casos los tamaños son enormes, por lo que dificultan la combustión y, desde el punto de vista químico, la eficiencia disminuye; de esta manera, como lo indica Averardo (2009), hay una gran cantidad de deficiencias en el proceso de cocido del ladrillo artesanal, que se ve reflejado en la gran producción de emisiones contaminantes, como queda evidenciado en el monitoreo.

Una vez analizados los procedimientos de moldeo del ladrillo, la etapa de preparación del horno y la quema, se plantearon las medidas desde el punto de vista de la ingeniería de procesos, ambiental, termodinámica, transferencia de calor y dinámica de fluidos, para subsanar las deficiencias, disminuir el impacto o, en su caso, mitigarlo. Cada una de estas soluciones se plasmó en un diseño de horno que se acercara a las condiciones a las que el productor ha venido trabajando. De esta manera se integra la visión del productor y el desarrollo de la ingeniería, a fin de dar un planteamiento a las problemáticas de operación, energéticas y ambientales.

Base de diseño

A partir del diagnóstico del proceso de elaboración de ladrillo y la operación, se identificaron las medidas para llevarlas a cabo en la conceptualización del nuevo horno. El primer aspecto planteado fue la construcción, tomando en cuenta que en un horno tradicional no existe una edificación, cimentación y en la mayor parte de los casos no existe techo, por lo que se inició con un esquema arquitectónico con cimientos y zapatas coladas, como se aprecia en la figura 3, con lo cual se enmarca la necesidad de este tipo de infraestructura que dé cuerpo al horno.

Figura 3. Base de diseño del horno. (a) Detalle constructivo de cimientos en plano arquitectónico. (b) Cimentación del horno ecológico en Parque ladrillero Tlajomulco de Zúñiga

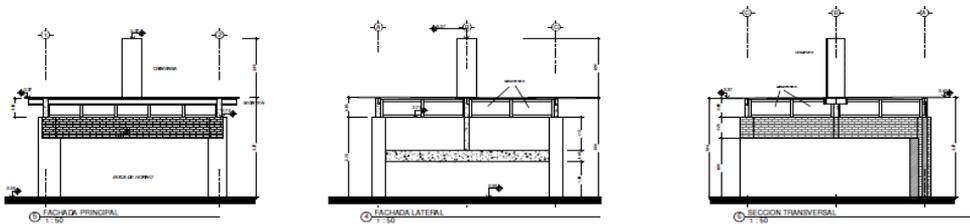


Fuente: Parque Ladrillero Tlajomulco de Zúñiga Jalisco (2017).

Como lo indican Fontalvo y Gutiérrez (2014), el proceso constructivo en un horno de ladrillo debe empezar con una cimentación robusta que le dé resistencia al cuerpo del horno. Como se observa, la doble hilada de cemento hace la base para la pared doble con ladrillo transversal.

Como se indica en la figura 4 del detalle constructivo, la boca del horno define el acceso para carga y cocimiento de las unidades que producir, con lo que las paredes funcionan como una barrera para la transferencia de calor, situación que en el horno tradicional resulta en una gran pérdida de energía por la falta de paredes.

Figura 4. Vistas frontales de horno ladrillero



Fuente: Elaboración propia.

Las paredes permiten darle geometría al cuerpo del horno y uniformizar la combustión que, en comparación con el horno tradicional, genera la baja eficiencia en la química del quemado de la leña. Por esto es tan importante la configuración del horno (Valdez *et al.*, 2018), ya que en gran parte dependerá del cuerpo del horno la producción de emisiones contaminantes. De esta forma la propuesta del horno se enfoca en el hogar, como se observa en la foto 5., donde la carga de ladrillo por cocer tiene acomodo en la sección baja recubierta de barro, con lo que se permite uniformidad en la transferencia de calor.

Otra de las deficiencias desde el punto de vista constructivo que se identificó fue la falta de techo, cubierta o loza que forme una barrera superior para disminuir la transferencia de calor. Esto provoca lo mismo que la falta de geometría, es decir, mala combustión. Por tanto, se planteó un techo ligero que no elevara el costo de la inversión, como se aprecia en la figura 5. Así se tiene una cubierta para contingencias como la lluvia, que echa a perder el proceso de cocido de ladrillo o, en su caso, hace que las caracte-

rísticas mecánicas disminuyan, con lo que baja la calidad y el productor tiene que reducir el costo.

Figura 5. Horno ecológico. (a) Cuerpo. (b) Techo



(a)

(b)

Fuente: Parque Ladrillero Tlajomulco de Zúñiga Jalisco (2017).

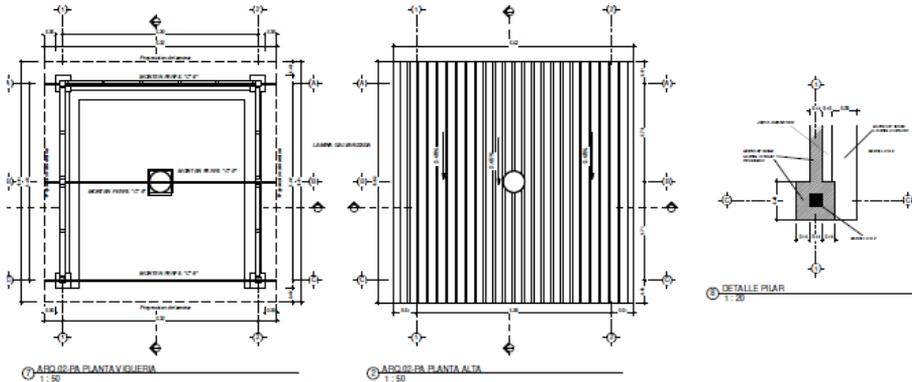
Teniendo en cuenta los aspectos constructivos, se espera mejorar el proceso de combustión y la uniformidad en el proceso de cocimiento, tratando de que la tonalidad rojiza que busca el productor alcance todo el volumen y no se concentre sólo en el centro, para que con esto también las pruebas mecánicas en el ladrillo puedan cumplir las normas en materia de construcción (Zavardino, 2002).

Instalaciones

Una vez que el cuerpo ha sido diseñado, se ha planteado la colocación de instalaciones auxiliares para el mejoramiento del proceso, primer elemento fundamental y que ya consideran las normas para hornos ladrilleros, como en el caso de la colocación de una chimenea. Este aspecto es importante para que los gases de la combustión tengan un tiro convectivo, es decir, por la alta temperatura se eleven y puedan dispersarse en la atmósfera (Valdez *et al.*, 2018). Por lo tanto, en la parte central del horno se instaló una chimenea con 8" de diámetro y 1.8 metros de altura sobre el nivel del techo, como se ve en la figura 6. Esta chimenea permite desalojar parte de los gases por el tiro natural y, al mismo tiempo, da una forma de medir las concentra-

ciones de los gases en ella y proporciona formalidad al horno ladrillero como fuente fija que reconocen las normas oficiales mexicanas en materia de límites permisibles.

Figura 6. Instalaciones auxiliares. (a) Detalle de la chimenea. (b) Vista de descarga con puerto de monitoreo.



(a)



(b)

Fuente: Parque Ladrillero Tlajomulco de Zúñiga Jalisco (2017).

Uno de los principales problemas detectados en la operación del horno tradicional es la combustión como proceso abierto, es decir, como aquel que no se lleva a cabo en una cámara cerrada. Los fenómenos a los cuales es sometido el proceso de combustión representan un sinnúmero de efectos, sobre todo en lo referente a la producción de hidrocarburos no quemados (HC) y dioxinas (Zavardino, 2002), como se aprecia en la figura 7 (a).

Figura 7. Operación del horno. (a) Combustión abierta del horno tradicional.
(b) Quemadores de alta eficiencia a gas LP



(a)

(b)

Nota: Para disminuir la producción de contaminantes, primeramente se hizo desde el punto de vista de la construcción y, desde las instalaciones, se llevó a cabo la colocación de quemadores de baja producción de óxidos de nitrógeno, como se observa en la figura 7 (b). La operación de los quemadores sólo es para el inicio del proceso de horneado, ya que se considera que, la etapa de transición la temperatura empieza a elevarse y este proceso, desde el punto de vista de la combustión, es de muy baja eficiencia.

Fuente: Parque Ladrillero Tlajomulco de Zúñiga Jalisco (2017).

Para mejorar la eficiencia de la combustión, se instaló un sistema de inyección de aire caliente, partiendo del balance energético en la cámara mediante la ecuación 1 (Wark, 1985).

$$Q \text{ cámara} = m \text{ aire } h \text{ aire} + m \text{ gas } PC \dots\dots \quad (1)$$

Donde:

- Q cámara: Calor suministrado en el horno (Kilowatts)
- m aire: Flujo de aire (kg/s)
- h aire: Entalpía del aire
- m gas: Flujo de gas LP
- PC: Poder calorífico (kJ/kg)

Figura 8. Sistema de inyección de aire caliente



Fuente: Parque Ladrillero Tlajomulco de Zúñiga Jalisco (2017).

Como la entalpía del aire es una función de la temperatura de inyección, si se incrementa, el calor del aire aumenta su energía y la función de oxidación en la cámara se refleja en una combustión más eficiente y con menos productos de la quema.

Otro de los factores que son determinantes en la combustión es el flujo de aire con su turbulencia. En las cámaras tradicionales el flujo es insuficiente y la turbulencia es baja, por lo que la madera no alcanza a incinerarse por completo y se producen las partículas suspendidas. Considerando esto, se propuso hacer venteos transversales en el acomodo del ladrillo, como se aprecia en la figura 9 (a), así como en la parte inferior una cama de generación de turbulencia por medio de venturis que aceleran el flujo, como se ve en la figura 9 (b).

Figura 9. Acomodo del ladrillo. (a) Venteos transversales. (b) Venturis



(a)



(b)

Fuente: Parque Ladrillero Tlajomulco de Zúñiga Jalisco (2017).

De las emisiones de la combustión que llegan a descargarse, algunas permanecen en el lugar del horno o, por las condiciones ambientales, se estratifican; por ello se decidió plantear especies *ficus*, como se ve en la figura 10. Se considera que estos árboles pueden adsorber algunas concentraciones de CO y CO₂, así como algunos compuestos orgánicos volátiles (Semarnat, 2015). Al colocarse esta barrera, se pretende controlar una parte de las emisiones y que al mismo tiempo productores planten más especies cercanas a sus hornos, de manera que, al mismo tiempo que son una instalación productiva, se transformen en núcleos biológicos.

Figura 10. Barrera biológica



Fuente: Parque Ladrillero Tlajomulco de Zúñiga Jalisco (2017).

Resultados

A partir de la caracterización del proceso de fabricación de ladrillo rojo en los hornos tradicionales se identificaron las principales deficiencias y, por medio del rediseño arquitectónico, estructural, energético y de proceso, se proyectó disminuir la huella de carbono producida en el horno tradicional. Así que se realizó una prueba de cocimiento en el horno para la capacidad establecida de 20 000 unidades, como se aprecia en la figura 11. Previamente se capacitó al usuario para el acomodo del ladrillo crudo dentro del horno

y para definir las alimentaciones de aire en los esquemas de preparación de los equipos de combustión y alimentación de aire sobrecalentado para el arranque del cocimiento, de tal forma que estuviera familiarizado con el equipo de proceso, sus elementos, la medición de temperatura de pared y las condiciones de seguridad, como el uso de calzado industrial, mandil y guantes carnaza. Con todos los elementos preparados arrancó la corrida y, de igual forma en que se hizo en el horno tradicional, se midieron las emisiones contaminantes. Los resultados se muestran en el diagrama 1 para establecer la comparativa de emisiones con el horno tradicional.

Como se puede observar, las características instrumentadas del horno ecológico permiten una disminución de los gases producto de la combustión. Para el CO, aunque no es un gas invernadero, su reducción protege la salud de los operadores, sobre todo si se considera que es un gas sin olor e incoloro pero altamente agresivo al sistema respiratorio. También hay un indicativo de que se reducen las emisiones de óxidos de nitrógeno al mejorar la combustión. Para el caso del CO₂ las emisiones se redujeron casi 45%, valor de suma importancia por ser el más representativo en el impacto al calentamiento de la atmósfera. En el caso de azufre y partículas, también hay descenso importante en sus concentraciones, lo que indica que la combustión del horno mejoró.

Figura 11. *Horno ecológico en operación*

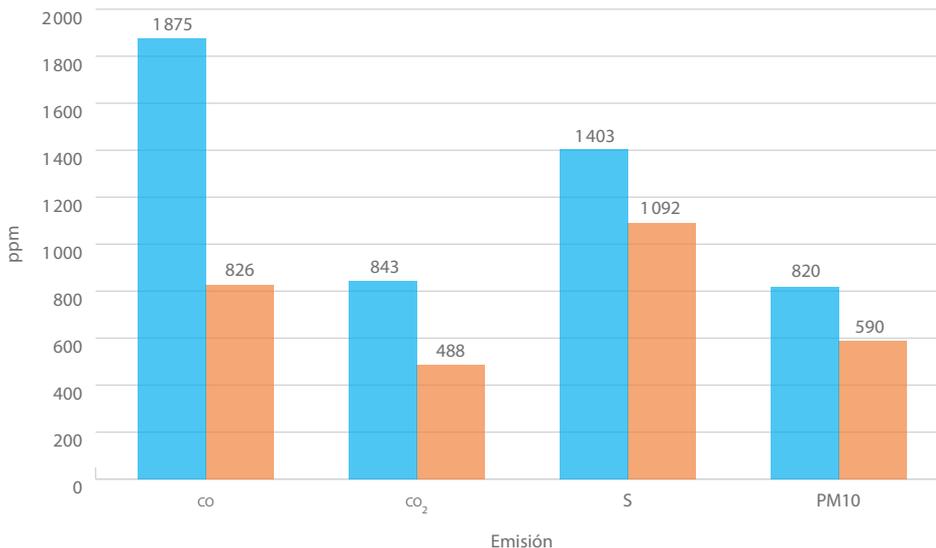


Fuente: Parque Ladrillero Tlajomulco de Zúñiga Jalisco (2017).

La configuración y la presentación del horno ecológico permite visualizar el proceso, de una manera más formal, como una fuente fija desde la cual gran parte de las emisiones se descargan por la chimenea y alcanzan a desarrollar el flujo para dispersarse y, sobre todo, tener menos contacto con el operador, que pudiera respirar estos gases nocivos. Además, aquellos gases que se estratifican alrededor del horno pueden ser metabolizados por la barrera biológica, intercambiando contaminantes por oxígeno, aunque no se reporta por especialistas las cantidades que pueden absorber, ya que dependen de las condiciones físicas del lugar, el tamaño de la planta y el número, pero en efecto es un elemento que, si se conserva alrededor del horno, podrá ayudar a disminuir y controlar las emisiones.

Los paneles solares que alimentan los sopladores y el concentrador solar para calentar el aire de inyección a la cámara de combustión, como energías limpias, permiten mejorar el proceso y representan una opción viable técnica y económica para que el productor de ladrillo vea su utilidad y pueden ser un usuario potencial, a fin de incrementar el uso de esta tecnología en su beneficio y en el del medio ambiente.

Figura 12. Emisiones de horno tradicional vs. ecológico



Fuente: Elaboración propia.

En términos termodinámicos y de transferencia de calor, la operación del horno registró una temperatura de pared de 32 °C, lo cual indica que las barreras térmicas con claro de espacio vacío permitieron reducir la transferencia de calor al ambiente, lo cual mejoró la temperatura del hogar del horno y, con esto, disminuyó las emisiones contaminantes, por lo que se aumentó la eficiencia del proceso al obtener un aprovechamiento del calor de combustión por energía interna de la leña.

Una vez terminado el proceso de cocimiento, se descargó la cámara del horno y se observó que el color rojizo que prefieren los productores y los clientes se uniformizó en la mayor parte de la cámara como resultado del incremento de la eficiencia térmica y la disminución de pérdida de calor, en comparación con el horno tradicional, en donde el color rojizo se presenta en su mayoría hacia el centro pero cercano a las paredes se decolora, signo de que se pierde calor por las paredes, lo cual da una razón más para convertir los hornos a ecológicos. En cumplimiento con las normas de construcción se realizaron pruebas de resistencia a la compresión, en las cuales el ladrillo alcanzó 16% mayor resistencia de la que pide la norma, por lo que es un producto que cumple la calidad requerida por el mercado de la construcción.

Al realizar una valoración técnica de las operaciones y compararla con respecto de las realizadas en los hornos tradicionales, el productor indica que no existen diferencias sustanciales en la carga del horno, pero sí en la preparación de los sistemas de combustión y de precalentamiento de aire solar, en los cuales se requiere mayor capacitación y entrenamiento, a fin de tener un control más específico del proceso de cocimiento del horno.

Una de las ventajas identificadas desde la operación es la disminución de los riesgos de accidentes de trabajo, ya que en el horno tradicional la geometría provoca desniveles que ocasionan derrumbes. Se enfatizó que se debe utilizar equipo de seguridad, lentes oscuros, guantes y peto de carnaza para evitar quemaduras, además de colocarse mascarilla para evitar respirar gases producto de la combustión.

Por otro lado, al evaluar el esquema de costos para cada una de las unidades producidas, se indicó que existe un incremento de 19% para una carga de 20 000 unidades, aunque, al aumentar la capacidad del horno, ésta puede disminuir en un orden de 11% para cargas de 45 000 ladrillos cocidos,

por lo que se vuelve competitiva al introducirla a un mercado verde o al *ecomarketing*.

El mantenimiento del horno y sus equipos demanda una limpieza de los paneles solares semanalmente, sopleteo de quemadores después de cada carga, revisión de la tubería de inyección de aire y lustrado de superficie a superficie de concentrador solar, mientras que en el cuerpo del horno hay que revisar las paredes después de cada quema para que, en su caso, se repare su superficie. Al hacer un estimado anual de los costos de mantenimiento preventivo, se pronostica en operación a plena carga 3.7% de la utilidad total y una vida útil de 25 años si se realiza una carga semanal.

Al evaluar el diseño, las instalaciones de equipos de proceso, la operación, el mantenimiento y el coste del ladrillo, el horno ecológico cumple con las formas de operación de los tradicionales en la mayoría de los requerimientos de los productores y, una vez que se capaciten, entrenen y operen en este nuevo modelo, podrán adaptar los esquemas para ponerlo en marcha, beneficiarse de las ventajas y, sobre todo, disminuir las afectaciones al medio ambiente, a la salud de los productores, con el fin de que este sector pueda transformarse a un esquema ecológico, sustentable y que contribuya a disminuir su huella de carbono mientras ofrece un producto de alta calidad y de fabricación nacional.

Conclusión

Los diferentes autores coinciden en la problemática ambiental que están provocando los hornos ladrilleros tradicionales al emitir grandes cantidades de gases como CO y CO₂ y partículas suspendidas, que generan una enorme huella de carbono que no se monitorea, lo cual da como consecuencia enfermedades de tipo respiratorio y degenerativas entre los trabajadores de este sector.

Al analizar los procesos de esta industria ladrillera tradicional, se identifica que se requiere reconvertir sus métodos de operación a esquemas eficientes y sustentables, aplicando ingeniería de procesos, instrumentación y controles ambientales que permitan reducir el impacto a la salud de las personas y al medio ambiente.

Las estructuras arquitectónicas y de concepto, la ingeniería de procesos, la utilización de gas LP al arranque del proceso, la inserción de fuentes de energía renovable y la identidad ambiental permitieron al horno ecológico construido disminuir 46% de la huella de carbono, por lo que es una opción ambiental y económicamente sustentable para los productores del sector ladrillero.

Ante los severos impactos que ha provocado el cambio climático, donde el sector ladrillero es un gran emisor de gases efecto invernadero, es evidente que el sector requiere del replanteamiento del esquema productivo para mejorar los hornos, transformándolos en ecológicos, desarrollando nuevos diseños arquitectónicos, insertando otras opciones de energías limpias, la utilización de la biomasa para sustituir la leña y la imperiosa necesidad de medir las cantidades de emisiones para establecer límites como fuente fija.

Finalmente, este sector representa un grupo importante dentro de la economía de muchos municipios en México; sin embargo, éstos han sido limitados en su participación para la toma de decisiones en beneficio de la comunidad y del medio ambiente por lo que es indispensable realizar un diagnóstico social de la integración de las ladrilleras en un orden representativo ante las autoridades gubernamentales.

Bibliografía

- Solminiach, H., Thenoux, G. (2011). *Procesos y técnicas de construcción* (5ª ed.). Ediciones Universidad Católica de Chile.
- Averardo, M. (2009). *El ladrillo Orígenes y desarrollo. resistencia*, Chaco, Argentina instituto argentino de cerámica roja. Consultado <https://arquitectonicofau.files.wordpress.com/2012/02/el-ladrillo-2009.pdf>.
- Romo, M., Cervera, L., Córdova, G. (2004). *Estudio urbano-ambiental de las ladrilleras en el municipio de Juárez*. Estudios Fronterizos, 5(9), 9-34.
- Naciones Unidas ONU. (2015). *Convención Marco sobre el Cambio Climático, Aprobación del Acuerdo de París*. FCCC/CP/2015/L.9
- Norma Ambiental Estatal NAE – SEMADET-002/2018. (s. f.). *Criterios y Especificaciones Técnicas para la Ubicación y Operación de Unidades Productoras de Cerámicos en el Estado de Jalisco*.
- Norma Técnica Ecológica NTE-IEG-001/98 *que establece las condiciones que deben reu-*

- nir los sitios destinados a la instalación y reubicación de hornos ladrilleros en el estado y las condiciones para la operación de los hornos en la elaboración y cocido de piezas elaboradas con arcillas para la construcción.
- Espíndola, C. y Valderrama, J. (2012). *Huella del Carbono. Parte 1: Conceptos, Métodos de Estimación y Complejidades Metodológicas*. Información tecnológica, 23(1), 163-176.
- Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático INECC. (2014). *Factores de emisión para los diferentes tipos de combustibles fósiles y alternativos que se consumen en México*. México.
- Márquez, M. (1989). *Combustión y quemadores*. Editorial Marcombo.
- Fontalvo, E., Gutierrez, E. (2014). *Diseño de un horno para cocción de ladrillos refractarios en una empresa del sector ladrillero*. Trabajo de grado. Facultad de Ingeniería, universidad autónoma del Caribe.
- Valdez, J., Aguilar, J., Sánchez, L., Alatrística, G., Pardo, A. (2018). *Diseño e implementación de un proceso alternativo para la fabricación de ladrillos a partir de relaves mineros de Oro*. Ingeniare. Revista Chilena de Ingeniería, 28(2), 268-276.
- Zavardino, J. (2002). *Brick Construction*. Fire Engineering.
- Wark, K. (1985). *Termodinámica* (2ª ed.). McGrawHill.
- Semarnat. (2015). *Informe de la Situación del Medio Ambiente en México*. https://apps1.semarnat.gob.mx:8443/dgeia/informe15/tema/pdf/Cap5_atmosfera.pdf
- Anderson, L. (1999). Spalling brick—material, design or construction problem? *Journal of Performance of Constructed Facilities*, 63
- Madurwar, M., Mandavgane, S., Ralegaonkar, R. (2014). *Use of sugarcane bagasse ash as brick material*. Current Science, 107(6).
- Agencia Suiza para el Desarrollo y la Cooperación COSUDE. (2015). *Programa de eficiencia energética en ladrilleras de américa latina para mitigar el cambio climático*. Programa EELA.

VIII. Modelado y simulación para ciudades más seguras y sostenibles

RACHID MARZOUG*

BEATRIZ CASTILLO TÉLLEZ**

JESÚS ÁGUILA LEÓN***

CARLOS JESAHEL VEGA GÓMEZ****

GERARDO ALBERTO MEJÍA PÉREZ*****

MARGARITA CASTILLO TÉLLEZ*****

DOI: <https://doi.org/10.52501/cc.178.08>

Resumen

Los accidentes viales son uno de los problemas graves que vivimos hoy en día. Una gran parte de estos accidentes ocurre en la intersección debido a la violación de los semáforos, especialmente en las ciudades. El modelado y la simulación pueden ayudar a identificar las causas de los accidentes y a desarrollar soluciones para prevenirlos. En este trabajo se propone un modelo teórico basado en herramientas físicas y computacionales que explica la relación entre la probabilidad de accidentes (P_{ac}) y los parámetros del tráfico vehicular en una intersección señalizada. Los resultados de la simulación muestran que la relación entre P_{ac} y el número de vehículos no es lineal. P_{ac} alcanza su máximo en la fase del tráfico libre y después empieza a dis-

* Doctor en Física computacional. Centro Universitario del Norte, Universidad de Guadalajara, México. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6578-696X>

** Doctora en Agua y Energía. Centro Universitario de Tonalá, Universidad de Guadalajara, México. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3747-6320>

*** Doctor en Diseño, Fabricación y Gestión de Proyectos Industriales. Departamento de Ciencias Básicas y Aplicadas, Centro Universitario de Tonalá, Universidad de Guadalajara. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0538-0842>

**** Doctor en Agua y Energía. Departamento de Innovación Tecnológica de la División de Desarrollo Tecnológico e Ingenierías del Centro Universitario de Tlajomulco, Universidad de Guadalajara, México. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2561-7763>

***** Maestro en Análisis de Sistemas Industriales. Centro Universitario de Tonalá. Universidad de Guadalajara, México. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1701-1171>

***** Doctora en Ingeniería en Energías Renovables con especialidad en Energía Solar. Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de Campeche, México. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9639-1736>

minuir. En la fase de congestionamiento conserva un valor fijo. Por otro lado, el riesgo de colisión aumenta con el incremento de la probabilidad de cambio de carril (P_{chg}) y específicamente antes de la intersección. Adicionalmente manejar a altas velocidades incrementa la probabilidad de accidentes y el riesgo de fatalidad en la intersección. Cuando se pretende disminuir P_{ac} , no es recomendable utilizar grandes periodos de semáforos. Este modelo nos muestra que, con base en el estado del tráfico que tenemos, podemos determinar el nivel de riesgo de accidentes.

Palabras clave: *Autómatas celulares, intersección, probabilidad de accidentes, riesgo de fatalidad.*

Introducción

El sistema de transporte es uno de los pilares fundamentales para el desarrollo de los sistemas económicos y sociales en todo el mundo; sin embargo, este desarrollo viene acompañado de varios problemas, tales como el congestionamiento vehicular, la contaminación y los accidentes.

A nivel económico, las decisiones de inversión y las obras dependen de la calidad de la infraestructura de transporte y de la libre circulación de mercancías y personas en las ciudades. El congestionamiento vehicular aumenta el consumo de combustible y desalienta la inversión futura. Este desperdicio cuesta miles de millones de dólares al año (Kahaner, 2005).

Además del impacto económico y ambiental, el congestionamiento vehicular tiene implicaciones sobre la salud psicológica de los conductores debido al estrés y al ruido que experimentan cuando están atascados durante largos periodos de tiempo.

Otro problema grave del tráfico vehicular son los accidentes de tráfico. A nivel social, los accidentes son un problema importante porque están directamente asociados con la vida humana. Según las estadísticas de la Organización Mundial de la Salud (OMS), los accidentes de tráfico provocan 1.3 millones de muertes cada año, y entre 20 y 50 millones padecen traumatismos no mortales causantes de discapacidad (OMS, 2022).

De acuerdo con datos del Instituto Nacional de Salud Pública (INSP), México ocupa el tercer lugar en Latinoamérica y el séptimo a nivel mundial en muertes por accidentes viales, con 22 muertes de jóvenes de entre 15 y 29 años al día y 24 000 decesos en promedio al año. Además, los accidentes viales constituyen la primera causa de muerte en jóvenes entre 5 y 29 años y la quinta entre la población general (Treviño, 2017). Estas pérdidas se traducen en un costo de \$150 000 000 000, lo que equivale a 1.7% del producto interno bruto (PIB) del país (*El Universal*, 2019).

Entre las soluciones más conocidas para resolver esos problemas encontramos el uso del transporte público; sin embargo, esta solución sólo concierne a una parte de la población. Otra opción ha sido la construcción de nueva infraestructura, la cual desafortunadamente es muy costosa y requiere mucho tiempo. Por tanto, es necesario encontrar una alternativa que nos permita asegurar una optimización del uso de la capacidad de las rutas disponibles. La simulación del tráfico vehicular se presenta como una posibilidad más económica, factible y eficiente que nos permite solucionar el problema del congestionamiento vehicular al optimizar el tráfico y utilizar la infraestructura disponible.

En este contexto varios investigadores en los campos de las matemáticas aplicadas y la física estadística han trabajado en el modelado y simulación de la dinámica del tráfico vehicular y han propuesto varios modelos de tráfico desde 1950 (Treviño, 2017; Nagel y Schreckenberg, 1992).

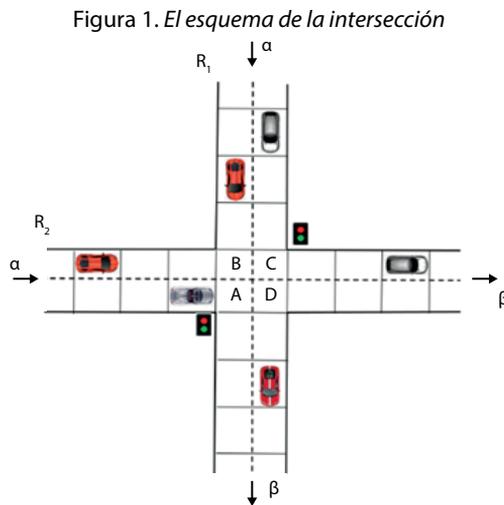
Uno de los más utilizados es el *modelo de autómatas celulares* (AC) debido a su sencillez y eficiencia en las simulaciones. Basándose en AC, Nagel y Schreckenberg (1992) propusieron uno de los modelos más famosos para estudiar el flujo de tráfico de un carril (modelo NaSch).

En este trabajo, por un lado, se estudiaron los accidentes en una intersección señalizada ocasionados por la falta de acatamiento a las indicaciones de los semáforos. Por otro lado, se estudió el impacto de diferentes parámetros, tales como la velocidad, el comportamiento humano y el periodo de los semáforos sobre la probabilidad de accidentes.

El trabajo está organizado de la siguiente manera: inicialmente se presenta el modelo usado con sus diferentes parámetros, posteriormente se discuten los resultados obtenidos y se finaliza con una conclusión del trabajo.

Modelo

Consideramos una intersección señalizada de dos carreteras (R1 y R2) que se cruzan en medio. En la primera carretera (R1) los vehículos se mueven de norte a sur, mientras que en la segunda carretera (R2) los vehículos se mueven de este a oeste. Dichos vehículos llegan al primer sitio de cada carretera con una probabilidad de entrar (inyección) α y de salir del sistema (extracción) con una probabilidad β , como se muestra en la figura 1.



Fuente: Marzoug, Lakouari, Pérez y Vega (2022).

Cada carretera se modela como una tabla dividida en L sitios (o células) idénticos. Cada sitio puede estar vacío u ocupado con un solo vehículo (discretización del espacio). Cada vehículo puede tener valores enteros de velocidad: $0, 1, 2, \dots, V_{\max}$. El tiempo también está discretizado y, en cada iteración, el i -ésimo vehículo se caracteriza por su velocidad $V_i(t)$ y su posición $x_i(t)$. Por ejemplo, un movimiento de 3 sitios ($V = 3$) por segundo (iteración) es equivalente a: $3 \times 7.5 = 22.5 \text{ ms} = 81 \text{ km/h}$, donde cada sitio representa 7.5 m en la realidad.

La posición de cada vehículo en el instante $t + 1$ se determina con las siguientes reglas (modelo de NaSch) (Nagel y Schreckenberg, 1992):

R1: Aceleración

$V_i' = \min (V_{it} + 1, V_{max})$: Cada vehículo intenta acelerar, pero respetando la velocidad máxima (V_{max}).

R2: Deceleración

$V_i'' = \min (d_i, V_i')$: donde d es el número de sitios vacíos enfrente del vehículo i . Aquí los vehículos toman en cuenta esta distancia para evitar los choques por atrás.

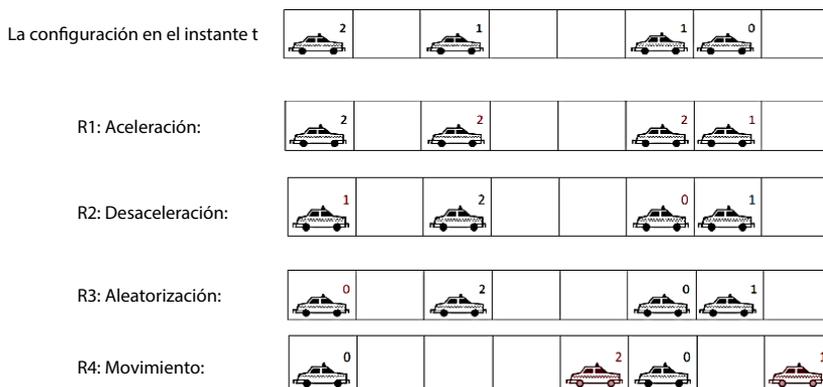
R3: Aleatorización

Si $V_i'' > 0$, entonces: $V_{it} + 1 = V_i'' - 1$ con una probabilidad P_b . Los vehículos disminuyen su velocidad con una probabilidad P_b . Eso representa a los conductores prudentes en la carretera, que deceleran aunque tienen suficiente espacio en frente.

R4: Movimiento

$x_i(t + 1) = x_i(t) + V_i$: La posición del vehículo i en el instante $t + 1$ es su posición en el instante t ($x_i(t)$) (la posición del sitio en la carretera) más la velocidad calculada con las tres reglas anteriores, como se muestra en la figura 2.

Figura 2. Representación de las cuatro reglas del modelo de movimiento de los vehículos. Los números indican las velocidades



Fuente: Chowdhury, Santen y Schadschneider (2000).

El tráfico vehicular se considera heterogéneo, donde se mezclan dos tipos de vehículos que se distinguen por sus velocidades máximas; lentos (V_{smax}) y rápidos (V_{fmax}). La fracción de vehículos rápidos y lentos se denota por F_f y F_s , respectivamente ($F_s=1-F_f$).

Por otro lado, se considera que la carretera tiene dos carriles. Los vehículos pueden cambiar de carril respetando las distancias de seguridad con los vehículos que están atrás y adelante de ellos (en los dos carriles) para evitar los choques (Chowdhury, Wolf y Schreckenberg, 1997).

En la intersección se utilizan los semáforos para controlar el flujo de tráfico. R1 recibe luz verde (prioridad) por un periodo T_g (simultáneamente luz roja para R2). Después de este periodo la luz se vuelve roja para R1 (simultáneamente luz verde para R2) por un periodo T_g .

En realidad, debido a algunas malas prácticas de manejo, como la violación de la luz roja, los conductores se ponen a sí mismos y a otros automovilistas en riesgo de accidentes.

En este trabajo se considera que los conductores pueden violar el semáforo en rojo con una probabilidad p' y se estudia la probabilidad de ocurrencia de accidentes (P_{ac}) en la intersección debido a la falta de respeto a las señalizaciones de los semáforos.

Cuando dos vehículos, uno con prioridad y el otro que viola el semáforo en rojo, llegan al mismo sitio de intersección al mismo tiempo, ocurre un accidente en el sitio A, B, C o D.

Definimos la probabilidad P_{ac} de la siguiente manera:

$$P_{ac} = 1 - T^{-1} \sum_{i=1}^N t_i = t_0 + \sum_{i=1}^N t_i \quad (1)$$

donde:

T es el tiempo de simulación.

N es el número de vehículos.

t_0 es el tiempo a partir del cual empieza el cálculo.

$t_i = \{1, \text{ si el } i\text{-ésimo vehículo cumple con la condición de accidente anterior. } 0, \text{ si no es el caso.}\}$

Joksch demostró que la relación entre el riesgo de fatalidad (P) y el cambio de velocidad del vehículo durante el choque es la siguiente (Joksch, 1993):

$$P = \Delta V 70.63.88 \tag{2}$$

donde $\Delta V = 12V_{22} + V_{12}$. V_1 y V_2 son las velocidades de los vehículos involucrados en el accidente.

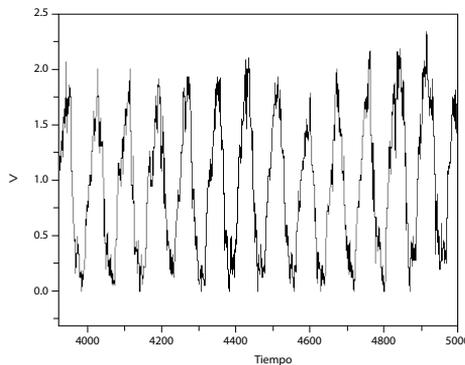
Resultados y discusión

La simulación se hizo basada en los siguientes parámetros:

- La longitud de cada carretera es $L = 200$ tramos, lo cual es equivalente a 1 500 m (cada tramo representa 7.5 m en la realidad).
- La probabilidad de deceleración es $P_b = 0.1$ (10%).
- $p' = 0.1$.
- La probabilidad de extracción y la fracción de vehículos rápido son $\beta = 0.8$ y $FF = 0.8$, (80%) respectivamente.
- El sistema se ejecuta durante 100 000 iteraciones y el cálculo de los resultados se realiza en las últimas 5 000 iteraciones.

La figura 3 representa la velocidad promedio en cada iteración de tiempo. Se puede ver que la velocidad tiene un perfil periódico debido a los tiempos de semáforos que cambian periódicamente.

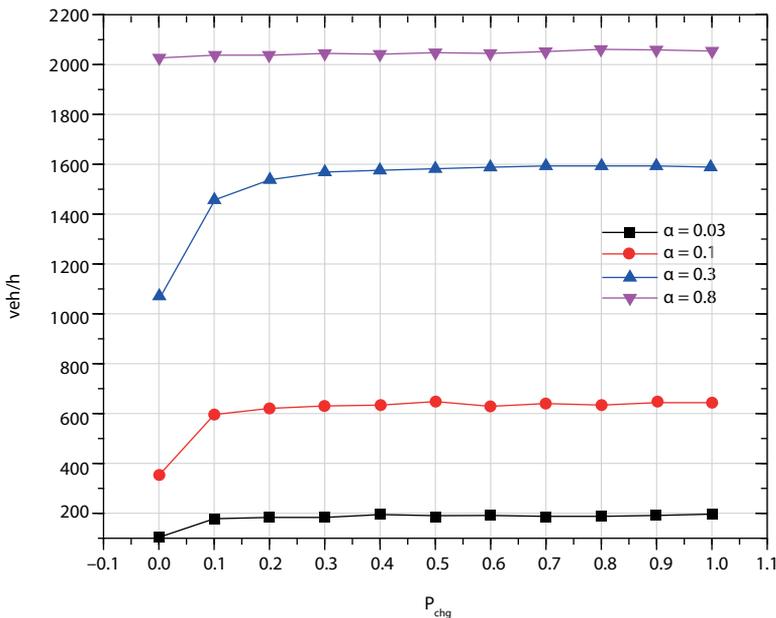
Figura 3. La velocidad en función del tiempo



Fuente: Elaboración propia.

En la figura 4 se representa el flujo vehicular, que es el número de vehículos que pasan la intersección por hora en función de la probabilidad de cambio de carril. Se puede observar que, para los valores muy bajos de α , el flujo es pequeño debido a que ingresan pocos vehículos al sistema. Con el aumento de α el flujo aumenta, y llega a más de 2000 veh/h en el caso de $\alpha = 0.8$. Por otro lado, se aprecia que la probabilidad de cambio de carril puede mejorar el flujo de una manera notable por los valores intermedios de α (30% en este caso), mientras que, para los valores muy altos de α , P_{chg} no tiene ningún impacto sobre el flujo vehicular. Aquí hay mucho congestionamiento y no hay espacio suficiente entre los vehículos, lo que no les permite cambiar de carril. Para los valores muy bajos de α , P_{chg} tiene un impacto muy pequeño sólo cuando pasamos de $P_{\text{chg}} = 0$ a $P_{\text{chg}} > 0$. En este caso hay muy pocos vehículos en las carreteras; por lo tanto, tienen mucho espacio frente a ellos. Consecuentemente cambiar de carril o no es casi lo mismo.

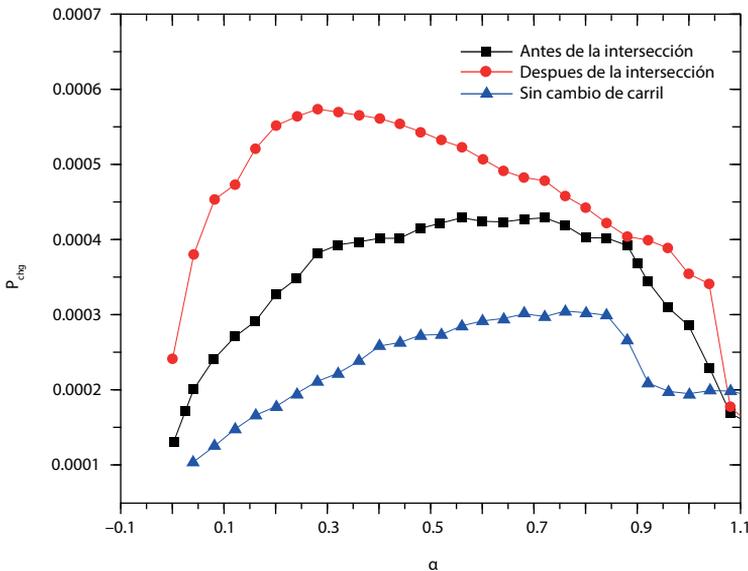
Figura 4. El flujo vehicular en la intersección en función de la probabilidad de cambio de carril por diferentes valores de la probabilidad de inyección



Fuente: Elaboración propia.

Para estudiar el impacto del cambio de carril sobre los accidentes, en la figura 5 se presenta la probabilidad de accidentes P_{ac} en función de la probabilidad de inyección en tres casos: la intersección sin cambio de carril, el cambio de carril está permitido solamente antes/después de la intersección. En los tres casos, P_{ac} aumenta con el número de vehículos, llega a un máximo y después empieza a disminuirse. Además, P_{ac} presenta los valores más pequeños en el caso de sin cambio de carril. Mientras que el cambio de carril antes y después de la intersección resulta en más riesgo de accidentes. Por lo tanto, el cambio de carril aumenta el riesgo de accidentes, más específicamente el cambio que ocurre antes de la intersección.

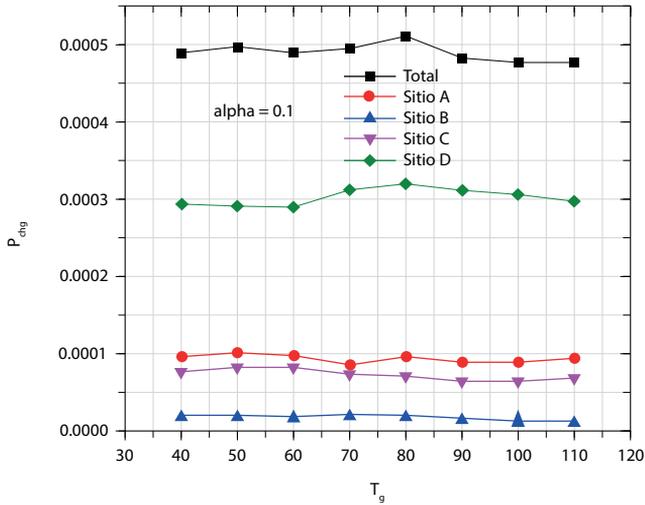
Figura 5. P_{ac} en función de α en tres casos: cambio antes/después de la intersección y sin cambio de carril



Fuente: Elaboración propia.

La figura 6 muestra cómo varía la probabilidad de accidentes P_{ac} en función del periodo del semáforo verde. Para los sitios A, B y C, P_{ac} es casi constante, mientras que, en el sitio D, P_{ac} aumenta ligeramente en los valores altos de T_g ($T_g \geq 70$). En otras palabras, el periodo de los semáforos no tiene que ser muy grande para disminuir los accidentes.

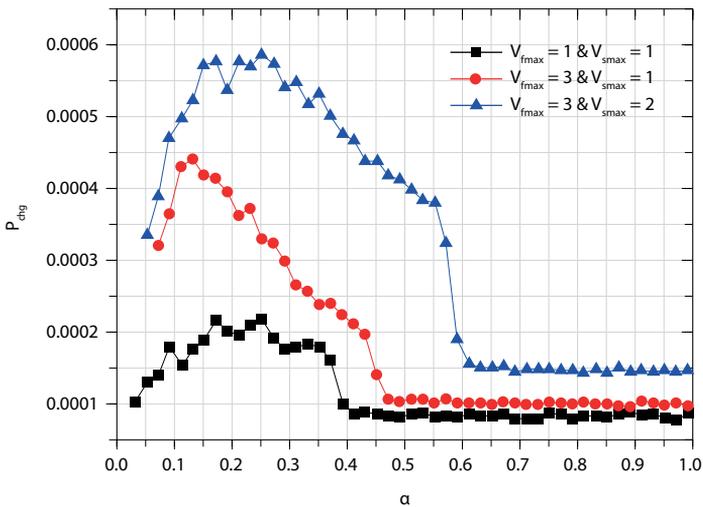
Figura 6. P_{ac} en función del tiempo del semáforo verde en los cuatro sitios de la intersección



Fuente: Elaboración propia.

Para estudiar el impacto de la velocidad máxima sobre los accidentes, se presenta P_{ac} en función de α por diferentes valores de V_{max} y el riesgo de fatalidad (P) en función de V_{max} (figura 7).

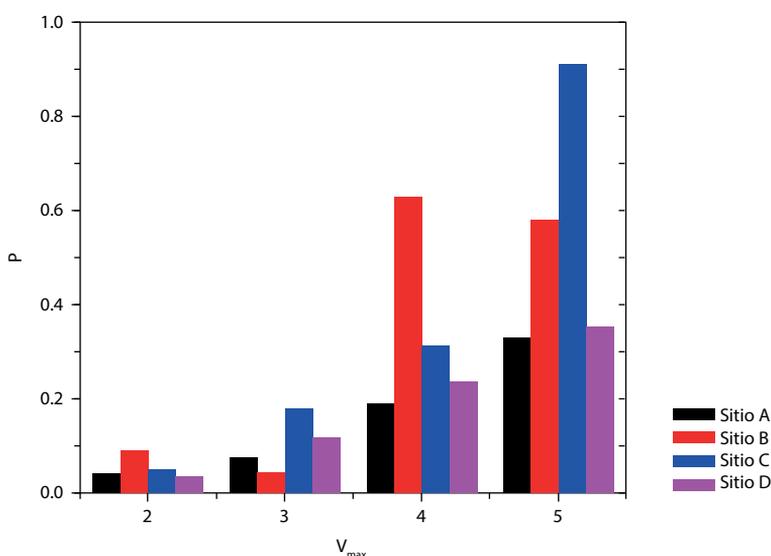
Figura 7. P_{ac} en función de α por diferentes valores de las velocidades máximas



Fuente: Elaboración propia.

La figura 8 P_{ac} tiene casi el mismo perfil cualitativo en los diferentes valores de V_{max} . Sin embargo, P_{ac} presenta valores muy altos con el aumento de la velocidad máxima de los vehículos rápidos y lentos V_{fmax} y V_{smax} . Por otro lado, el riesgo de fatalidad P aumenta con el aumento de V_{max} en los cuatro sitios de la intersección (figura 8), presentando valores muy altos por $V_{max} \geq 4$, lo que significa una alta probabilidad de muerte en el caso de un accidente.

Figura 8. El riesgo de fatalidad en los cuatro sitios de la intersección en función de la velocidad máxima



Fuente: Elaboración propia.

Conclusión

Utilizando herramientas físicas y computacionales, se presentó un modelo teórico que nos permite estudiar la probabilidad de accidentes en una intersección señalizada. Los resultados indican que la probabilidad de accidentes y el riesgo de fatalidad son afectados por una combinación de varios parámetros, como el cambio de carril, las velocidades máximas, el número de vehículos que entran y el tiempo de ciclo de los semáforos.

La probabilidad P_{ac} aumenta con el número de vehículos que entran al sistema y llega a su máximo en la fase del tráfico libre, donde hay pocos vehículos. Después empieza a disminuir. En la fase de congestiónamiento, P_{ac} queda constante. Además, el cambio de carril, específicamente antes de la intersección, aumenta mucho la probabilidad de accidentes. P_{ac} y el riesgo de fatalidad P aumentan de una manera significativa con el aumento de las velocidades máximas. Por otro lado, el incremento del tiempo de los semáforos puede aumentar ligeramente P_{ac} .

El propósito de este trabajo es demostrar cómo es posible modelar y simular fenómenos reales, investigando la manera en que su comportamiento se modifica al variar diversos parámetros. Los resultados obtenidos y los principios empleados en esta labor pueden extrapolarse a otros campos, como el flujo de peatones, brindando mejoras en la movilidad y seguridad urbanas contribuyendo así a la creación de ciudades sostenibles.

Bibliografía

- Chowdhury, D., Santen, L., y Schadschneider, A. (2000). Statistical physics of vehicular traffic and some related systems. *Physics Reports*, 329(4-6), 199-329.
- Chowdhury, D., Wolf, D. E., y Schreckenberg, M. (1997). Particle hopping models for two-lane traffic with two kinds of vehicles: Effects of lane-changing rules. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 235(3-4), 417-439. [https://doi.org/10.1016/S0378-4371\(96\)00314-7](https://doi.org/10.1016/S0378-4371(96)00314-7)
- Daganzo, C. F. (1994). The cell transmission model: A dynamic representation of highway traffic consistent with the hydrodynamic theory. *Transportation Research Part B*, 28(4), 269-287. [https://doi.org/10.1016/0191-2615\(94\)90002-7](https://doi.org/10.1016/0191-2615(94)90002-7)
- El Universal*. (2019, julio 30). Accidentes viales en México cuestan 150 mil mdp. <https://www.eluniversal.com.mx/cartera/accidentes-viales-en-mexico-cuestan-150-mil-mdp>
- Joksich, H. C. (1993). Velocity change and fatality risk in a crash-A rule of thumb. *Accident Analysis and Prevention*, 25(1), 103-104. [https://doi.org/10.1016/0001-4575\(93\)90102-3](https://doi.org/10.1016/0001-4575(93)90102-3)
- Kahaner, L. (2005, febrero). PRIMEDIA Business Magazines y Media Inc.
- Lighthill, M. J., y Whitham, G. B. (1955). On kinematic waves II. A theory of traffic flow on long crowded roads. *Proceedings of the Royal Society of London. Series A. Mathematical and Physical Sciences*, 229(1178), 317-345. <https://doi.org/10.1098/rspa.1955.0089>
- Marzoug, R., Lakouari, N., Pérez Cruz, J. R., y Vega Gómez, C. J. (2022). Cellular Automa-

- ta Model for Analysis and Optimization of Traffic Emission at Signalized Intersection. *Sustainability*, 14(21), 14048.
- Nagel, K. y Schreckenberg, M. (1992). A cellular automaton model for freeway traffic. *Journal de Physique*, 2(12), 2221–2229.
- OMS. (2022). Traumatismos causados por el tránsito. <https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/road-traffic-injuries>
- Treviño Siller, S. (2017). Consejos para prevenir accidentes viales. *Gaceta INSP*, 1(1), 46. https://www.insp.mx/resources/images/stories/Gaceta/vol1/gaceta_vol1.pdf

IX. Democratización de la energía y transición hacia la electromovilidad sostenible

JESÚS ÁGUILA LEÓN*

NÉSTOR ORTIZ RODRÍGUEZ**

RACHID MARZOUG***

DOI: <https://doi.org/10.52501/cc.178.09>

Resumen

Este capítulo ofrece un análisis exhaustivo de la electromovilidad sostenible, un tema crucial para el futuro del transporte y la sostenibilidad ambiental. Abordamos desde la necesidad de una infraestructura de carga robusta y adaptativa hasta la importancia de políticas de incentivos personalizadas que atiendan las necesidades de diversos grupos demográficos y regiones. Además, se destaca el papel crucial de la educación y la concienciación pública en la transformación hacia una cultura más sostenible. Se presenta la importancia de modelos innovadores de negocio y tecnologías emergentes, como la generación distribuida y las microrredes, que podrían ser la clave para una implementación exitosa. El capítulo concluye con una serie de recomendaciones estratégicas, diseñadas para guiar a los responsables de la toma de decisiones, empresas y ciudadanos en la adopción efectiva de la electromovilidad sostenible. Este capítulo es una lectura esencial para cualquiera interesado en comprender los múltiples aspectos y desafíos de la electromovilidad en el contexto actual.

* Doctor en Diseño, Fabricación y Gestión de Proyectos Industriales. Departamento de Ciencias Básicas y Aplicadas, Centro Universitario de Tonalá, Universidad de Guadalajara. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0538-0842>

** Doctorando en Ingeniería en Energía. Universidad Nacional Autónoma de México, México. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2202-6776>

*** Doctor en Física Informática. Centro Universitario del Norte, Universidad de Guadalajara, México. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6578-696X>

Palabras clave: *Electromovilidad sostenible, infraestructura de carga, políticas de incentivos, participación ciudadana, modelos de negocio innovadores.*

Introducción

La problemática actual en el ámbito mundial se centra en el abasto de energía de manera sostenible y la disminución de la emisión de gases de efecto invernadero, lo cual impacta de manera significativa en el transporte y la movilidad a nivel global. Bajo este contexto, buscar medios para lograr la democratización de la energía en pos de una transición sostenible hacia la electromovilidad es fundamental, de tal manera que logremos una reducción en nuestra dependencia de los combustibles fósiles y mejoremos la calidad de vida en las áreas urbanas del país.

Actualmente, México enfrenta retos en la transición energética de fuentes convencionales a fuentes de energía renovable, en un escenario con escasos instrumentos de fomento y un marco regulatorio complicado. El transporte público y privado en las grandes ciudades está constituido principalmente por vehículos motorizados que utilizan combustibles fósiles, cuando bien podría fomentarse la adopción de tecnologías híbridas basadas en energías renovables para reducir de esta manera el efecto negativo sobre el medio ambiente y la salud de la población en áreas urbanas, especialmente aquellas densamente pobladas.

Dadas las características geográficas del país, México cuenta con un gran potencial para el aprovechamiento de recursos de energía renovable, como la energía solar fotovoltaica y eólica. Utilizar este tipo de tecnologías de aprovechamiento de fuentes de energía renovable permitirá, a corto y mediano plazo, sustituir parcialmente las fuentes convencionales de energía para el transporte motorizado y, a largo plazo, lograr un cambio radical en la matriz energética que garantice el suministro necesario para asegurar el crecimiento económico del país bajo un esquema de sostenibilidad y seguridad energética.

La adopción de la energía solar fotovoltaica y eólica como recursos renovables, *gratuitos* y ampliamente disponibles en el país representa una opción atractiva para suministrar la demanda energética del transporte

motorizado de manera sostenible y respetuosa con el medio ambiente, con lo cual se contribuye a la implementación de una industria ecológica en México. En este sentido, es importante destacar la necesidad de una estrategia clara y una visión de largo plazo para lograr una transición efectiva hacia un sistema de transporte sostenible y equitativo en el país.

Este capítulo abordará las oportunidades y desafíos en la transición hacia la electromovilidad en México y cómo esta transición puede contribuir a una mayor democratización de la energía. Se analizará la situación actual del transporte y la infraestructura en México, destacando las problemáticas existentes y el potencial de la electromovilidad para abordar estos retos. Además, se examinarán las políticas y estrategias que pueden facilitar la transición hacia un sistema de movilidad sostenible y equitativo, incluyendo la promoción de vehículos eléctricos, la mejora del transporte público y la interacción entre la movilidad y la planeación urbana.

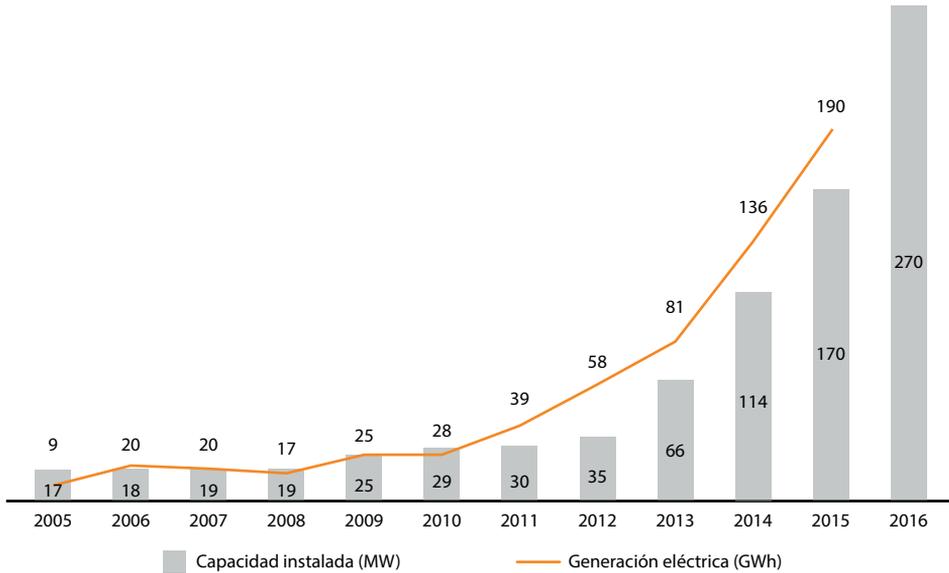
Contexto energético de México

México, como país en desarrollo, enfrenta numerosos desafíos en su contexto energético, especialmente en términos de diversificación, eficiencia y sostenibilidad. A pesar de ser un importante productor de petróleo, ha estado experimentando una disminución en la producción de hidrocarburos y una creciente dependencia de las importaciones de gas natural y productos petrolíferos (Secretaría de Energía, 2013). Esta situación ha llevado al país a buscar alternativas para diversificar su matriz energética y reducir su dependencia de los combustibles fósiles.

El potencial de las fuentes de energía renovable en México es significativo y se encuentra en gran parte sin explotar. La radiación solar promedio en el país es de aproximadamente 5 kWh/m² al día, lo que sitúa al país entre los más privilegiados en cuanto a recursos solares (Irerí *et al.*, 2019). Además, México cuenta con áreas de alto potencial eólico, especialmente en la región del Istmo de Tehuantepec, donde se han registrado velocidades del viento superiores a los 8 m/s (Secretaría de Gobernación, 2015). Estas condiciones presentan oportunidades importantes para el desarrollo de la energía solar y eólica en el país. A continuación se muestran las proyecciones de

generación de energía por medio de tecnologías solar fotovoltaica (figura 1) y eólica (figura 2) para nuestro país.

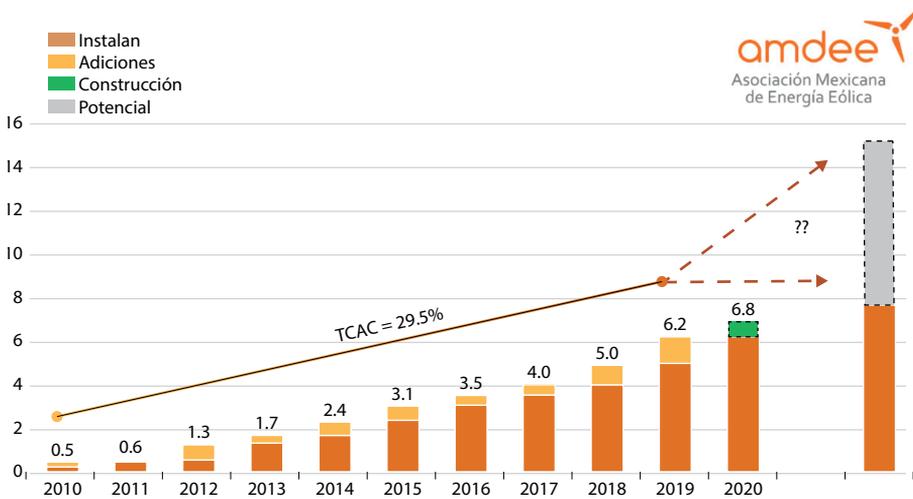
Figura 1. Evolución de la capacidad y generación de energía solar fotovoltaica en México



Fuente: ProMéxico, GIZ y IER-UNAM (2017).

La figura 1 muestra claramente el aumento constante de la capacidad instalada y la generación neta de energía a partir de campos solares fotovoltaicos desde 2005 hasta la actualidad. En los últimos años, este crecimiento ha sido aún más significativo debido a la reducción de los costos de los paneles solares y el aumento en la eficiencia de los sistemas fotovoltaicos. De hecho, desde 2021, la energía solar se ha convertido en una de las fuentes de energía renovable más utilizadas en todo el mundo, al grado de superar incluso la energía hidroeléctrica. Es importante destacar que la energía solar fotovoltaica tiene un gran potencial en México debido a sus condiciones climáticas y geográficas. De hecho, la región del norte del país cuenta con uno de los niveles más altos de radiación solar en todo el mundo, lo que la convierte en una de las más adecuadas para la generación de energía solar.

Figura 2. Proyecciones del sector eólico en México



Fuente: AMDEE (2023).

La figura 2 muestra claramente el notable crecimiento de la capacidad instalada de tecnologías de aprovechamiento eólico en México, desde 2010 hasta la actualidad. Esta fuente de energía renovable se ha consolidado como una de las más importantes del país representa aproximadamente 10% de la capacidad total instalada en el país en 2021, según datos de la Secretaría de Energía (SENER). De esta manera, la energía eólica se ha convertido en una prometedora fuente de energía para México, ya que el país cuenta con uno de los mejores recursos eólicos del mundo, especialmente en la región del Istmo de Tehuantepec, en el Estado de Oaxaca.

Aunque ha habido avances en la implementación de proyectos de energía renovable en México durante la última década, su participación en la matriz energética del país sigue siendo limitada. Según datos de la SENER, en 2020 sólo 25.5% de la energía del país provino de fuentes renovables, mientras que 74.52% fue generada por fuentes convencionales. De esa fracción renovable, 20.77% provino de fuentes fotovoltaicas y 28.4% de campos eólicos. Las tecnologías fotovoltaicas y eólicas son especialmente prometedoras para la generación distribuida, ya que no requieren condiciones orográficas especiales, como sucede con la energía hidroeléctrica y geotérmica. En este sentido, son las más adecuadas para una transición hacia la

electromovilidad. Sin embargo, México todavía se enfrenta a obstáculos significativos para el despliegue masivo de estas tecnologías, como barreras regulatorias, financieras e infraestructurales (Diario Oficial de la Federación, 2013).

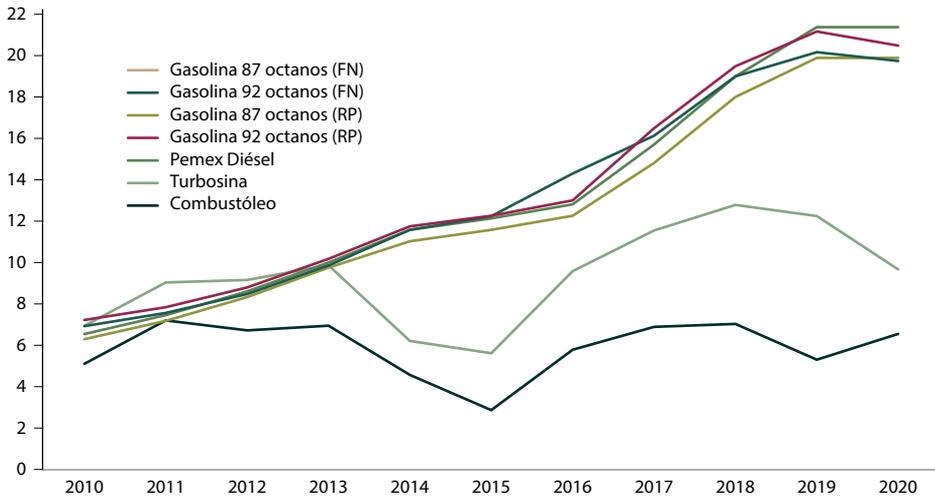
La necesidad de diversificar y descarbonizar la matriz energética de México se ve acentuada por la creciente demanda de energía en el país, impulsada principalmente por el crecimiento económico y demográfico (Villavicencio y Millan, 2020). El sector de transporte es el mayor consumidor de energía en México, representando aproximadamente el 43% del consumo final de energía y siendo responsable de más del 25% de las emisiones de gases de efecto invernadero (OECD, 2016).

En el caso específico de México, la dependencia del transporte en combustibles fósiles es muy alta, el petróleo sigue siendo la principal fuente de energía utilizada para el transporte. Esto se debe a que México es uno de los principales productores de petróleo en América Latina y, por lo tanto, ha desarrollado una importante industria alrededor de este recurso natural.

Sin embargo, la dependencia del petróleo para el transporte tiene implicaciones importantes en términos de seguridad energética, ya que la economía mexicana está altamente expuesta a las fluctuaciones del precio internacional del crudo. Además, la alta demanda de combustibles fósiles para el transporte es una de las principales causas de la contaminación del aire en las áreas urbanas del país, lo que afecta negativamente la salud de los ciudadanos.

En la figura 3 se aprecia cómo el precio de venta al público de los productos refinados del petróleo ha ido con una tendencia de alza desde 2010. Esto se ha debido a múltiples factores, como el agotamiento de yacimientos en explotación, el mercado internacional y la inflación. Esta alza de costos para el sector de movilidad privado y público lleva a la necesidad de buscar opciones de transporte menos dependientes de combustibles fósiles.

Figura 3. Precios de venta al público de productos refinados del petróleo



Fuente: SENER (2020).

Por lo tanto, la transición hacia sistemas de movilidad más sostenibles y limpios es una prioridad para México. En los últimos años, el Gobierno mexicano ha implementado políticas y programas para fomentar el uso de vehículos eléctricos y otras alternativas de transporte sostenible, como el transporte público masivo y las bicicletas. Aunque aún queda un largo camino por recorrer, México está trabajando para lograr una transición exitosa hacia un sistema de movilidad más sostenible y menos dependiente de los combustibles fósiles.

La electromovilidad en México

La electromovilidad en México, a medida que emerge en el ámbito nacional, ha despertado una creciente atención en torno a la sostenibilidad y la búsqueda de alternativas más limpias y eficientes al transporte convencional. El país, en su travesía hacia un futuro más sostenible, se encuentra ante una serie de desafíos y oportunidades que se analizan a continuación, junto con la situación actual de la infraestructura de carga en el territorio nacional.

El transporte es uno de los principales sectores que contribuye a la emisión de gases de efecto invernadero y contaminantes atmosféricos. El cambio hacia un sistema de transporte limpio y eficiente es crucial para alcanzar los objetivos de mitigación del cambio climático y mejorar la calidad del aire en las ciudades. La electromovilidad, que implica la utilización de vehículos eléctricos (VE) en lugar de motores de combustión interna (MCI), representa una solución prometedora para enfrentar estos desafíos.

La adopción de vehículos eléctricos en México, aunque todavía incipiente, ha experimentado un crecimiento sostenido en los últimos años. Según datos del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI, 2023), el parque vehicular eléctrico en México ha aumentado en un promedio anual de 40% entre 2016 y 2020. A pesar de este crecimiento, la penetración de vehículos eléctricos en el mercado automotriz nacional sigue siendo baja, pues representa apenas 0.5% del total de vehículos en circulación en 2020.

Beneficios y desafíos de la electromovilidad

En México, la electromovilidad trae consigo una multitud de beneficios que abarcan aspectos ambientales, económicos y sociales. Entre los principales beneficios, destacan la reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero, la disminución de la contaminación atmosférica en las ciudades y la diversificación de la matriz energética del país. Asimismo, la transición hacia la electromovilidad puede generar nuevos empleos en el sector de energías renovables y fomentar el desarrollo tecnológico local (Zagorodny, 2023).

Los VE representan una alternativa más limpia y eficiente al transporte convencional basado en MCI. Al operar con electricidad en lugar de combustibles fósiles, los VE emiten menos gases de efecto invernadero y contaminantes atmosféricos, lo que contribuye a mejorar la calidad del aire y a reducir el impacto del cambio climático. Además, debido a su mayor eficiencia energética, los VE pueden generar ahorros en costos de combustible y mantenimiento para los usuarios. Estos ahorros pueden ser particularmente significativos en el caso de flotas comerciales y de transporte público, donde los vehículos recorren largas distancias y tienen un mayor desgaste.

La adopción de vehículos eléctricos también puede impulsar la creación de empleo en el sector de energías renovables, ya que la demanda de electricidad generada a partir de fuentes limpias y sostenibles aumenta con el crecimiento del parque vehicular eléctrico. Además, la transición hacia la electromovilidad puede fomentar el desarrollo tecnológico local al incentivar la investigación y la innovación en áreas clave, como el diseño y la producción de baterías, sistemas de carga y vehículos eléctricos.

Por otro lado, la adopción de vehículos eléctricos en México también enfrenta desafíos considerables. El alto costo inicial de los vehículos eléctricos es uno de los principales obstáculos para su adopción masiva. Aunque los precios de los VE han disminuido en los últimos años debido a la reducción de los costos de producción de las baterías y a la economía de escala, todavía siguen siendo más caros que los vehículos de MCI. La falta de incentivos fiscales y económicos para la adquisición de vehículos eléctricos en México también dificulta su adopción a gran escala. Mientras que en otros países se han implementado políticas de incentivos, como exenciones fiscales, subsidios y acceso preferencial a estacionamientos y carriles exclusivos, en México estas medidas aún son limitadas y no han sido suficientes para impulsar la demanda de VE. La insuficiente infraestructura de carga es otro desafío importante para la adopción de vehículos eléctricos en México. A pesar de que el número de estaciones de carga ha aumentado en los últimos años, la red de carga todavía es limitada y está concentrada en las principales áreas urbanas, lo que dificulta la adopción de VE en áreas rurales y en ciudades más pequeñas.

Situación actual de la infraestructura para vehículos eléctricos

El desarrollo de una infraestructura de carga adecuada es esencial para impulsar la adopción de vehículos eléctricos en México. A pesar de los avances realizados en los últimos años, el número de estaciones de carga todavía resulta insuficiente para satisfacer las necesidades de la creciente flota de vehículos eléctricos en el país (Gobierno de México, 2019). La falta de una infraestructura de carga sólida y confiable limita el potencial de cre-

cimiento del mercado de vehículos eléctricos y representa un obstáculo para la transición hacia una movilidad más sostenible y eficiente.

El Gobierno mexicano ha reconocido la importancia de impulsar la infraestructura de carga y ha puesto en marcha programas y políticas para fomentar su desarrollo. Un ejemplo de ello es el Programa para el Desarrollo del Sistema Eléctrico Nacional (Gobierno de México, 2023), que busca promover la inversión en infraestructura de carga y la integración de energías renovables en la red eléctrica nacional (SENER, 2023). Este programa tiene como objetivo principal aumentar la capacidad de generación de energía eléctrica a partir de fuentes renovables y mejorar la eficiencia del sistema eléctrico, a fin de satisfacer la creciente demanda de electricidad asociada con la expansión del parque vehicular eléctrico.

A pesar de estos esfuerzos, aún queda mucho por hacer para garantizar una infraestructura de carga adecuada en México. Resulta fundamental incrementar la inversión pública y privada en este ámbito, así como fomentar la cooperación entre los diferentes actores involucrados, incluyendo el Gobierno, la industria automotriz y las empresas de energía. Además, es necesario abordar otros aspectos clave del sistema de carga, como la generación distribuida y las microrredes, que pueden desempeñar un papel crucial en la transición hacia la electromovilidad.

La *generación distribuida* se refiere a la producción de energía eléctrica a pequeña escala y en proximidad a los puntos de consumo, utilizando fuentes de energía renovable, como la solar, eólica o biomasa. Este tipo de generación presenta varias ventajas en comparación con la generación centralizada en grandes plantas de energía, como la reducción de las pérdidas de transmisión y distribución, la disminución de la presión sobre la red eléctrica y la promoción de la resiliencia energética. En el contexto de la electromovilidad, la generación distribuida puede contribuir a la expansión de la infraestructura de carga al facilitar la instalación de estaciones de carga en áreas donde la red eléctrica es limitada o inexistente y al proporcionar una fuente de energía limpia y sostenible para los vehículos eléctricos.

Las microrredes son sistemas eléctricos de pequeña escala que pueden operar de manera autónoma o interconectada con la red eléctrica principal. Estas redes, que pueden incluir fuentes de generación distribuida, sistemas

de almacenamiento de energía y cargadores de vehículos eléctricos, ofrecen una solución flexible y resiliente para la gestión de la demanda de energía y la integración de VE en el sistema eléctrico. Las microrredes pueden ser particularmente útiles en áreas rurales, zonas remotas o regiones con una red eléctrica débil o inestable, donde la instalación de infraestructura de carga convencional puede ser complicada o costosa. Además, al combinar diferentes fuentes de energía renovable y sistemas de almacenamiento de energía, las microrredes pueden garantizar un suministro de energía constante y confiable para los cargadores de VE, lo que a su vez aumenta la confianza de los usuarios en la disponibilidad y accesibilidad de la infraestructura de carga.

Uno de los desafíos clave en el desarrollo de microrredes y generación distribuida para la infraestructura de carga de vehículos eléctricos en México es la necesidad de una mayor coordinación y colaboración entre los distintos actores involucrados. Esto incluye a los reguladores, las empresas de energía, los fabricantes de vehículos eléctricos y cargadores, así como a las autoridades locales y nacionales. Además, es necesario establecer un marco regulatorio adecuado que permita y promueva la implementación de microrredes y la generación distribuida en el país, lo mismo que garantizar la interoperabilidad y la estandarización de los sistemas de carga.

Otro aspecto importante que considerar es la educación y la concientización de la población en general y de los propietarios de vehículos eléctricos en particular. Es esencial que los usuarios comprendan los beneficios de la generación distribuida y las microrredes, así como las diferencias entre los distintos tipos de cargadores y sistemas de carga. Además, se deben promover prácticas de carga óptimas, como la carga en horarios de baja demanda eléctrica y la utilización de tarifas diferenciadas para incentivar el uso de la infraestructura de carga de manera eficiente y sostenible.

En este contexto, la capacitación y el desarrollo de habilidades técnicas en el sector de la electromovilidad es fundamental. México debe invertir en la formación de profesionales capacitados en la instalación, operación y mantenimiento de infraestructuras de carga, generación distribuida y microrredes. Esto permitirá no sólo impulsar la adopción de vehículos eléctricos, sino también contribuir al crecimiento económico y la creación de empleo en el sector de las energías renovables y la electromovilidad.

En conclusión, el desarrollo de una infraestructura de carga adecuada es crucial para impulsar la adopción de vehículos eléctricos en México y avanzar hacia una movilidad más sostenible y eficiente. La generación distribuida y las microrredes ofrecen soluciones flexibles y resilientes que pueden contribuir a la expansión de la infraestructura de carga en el país, siempre y cuando se aborden los desafíos relacionados con la regulación, la colaboración entre actores y la educación de los usuarios. Incrementar la inversión pública y privada en estos ámbitos, así como fomentar la cooperación entre los diferentes actores involucrados, será clave para garantizar un futuro más limpio y sostenible en el transporte mexicano.

Democratización de la energía para una transición sostenible a EV

La democratización de la energía es un concepto clave en la transición hacia un futuro energético sostenible y equitativo. Este proceso implica la participación activa y el empoderamiento de la ciudadanía en la toma de decisiones relacionadas con la producción, distribución y consumo de energía. En este capítulo se exploran los aspectos clave de la democratización de la energía en México, incluyendo la descentralización y el acceso a energías renovables, la participación ciudadana en la transición energética y los modelos de negocio y políticas públicas para la electromovilidad.

Descentralización y acceso a energías renovables

La descentralización del sistema energético se erige como uno de los pilares fundamentales en el proceso de democratización de la energía. La adopción de modelos de generación distribuida y el desarrollo de microrredes permiten a los usuarios y comunidades no sólo producir su propia energía, sino también gestionarla de manera eficiente. Este enfoque reduce significativamente la dependencia de las grandes compañías eléctricas y, por ende, de los combustibles fósiles, que han sido históricamente la columna vertebral del sistema energético mexicano.

En México, el crecimiento exponencial de la generación distribuida ha sido catalizado por varios factores. Uno de los más notables es la disminución en los costos de las tecnologías de energía renovable, como la energía solar fotovoltaica y la energía eólica. Además, políticas públicas promovidas por entidades como el Instituto Nacional de Electricidad y Energías Limpias (INEEL) han incentivado la adopción de estas tecnologías a nivel residencial e industrial. Según datos del INEEL del año 2020, la implementación de estas políticas ha tenido un impacto positivo en la penetración de fuentes de energía renovable en el país.

Participación ciudadana en la transición energética

La toma colectiva de decisiones y el empoderamiento de la ciudadanía en la gestión de los recursos energéticos son aspectos fundamentales que pueden facilitar la implementación de políticas y proyectos que reflejen las necesidades y preferencias de la población. Además, la participación ciudadana contribuye significativamente a la sensibilización y educación sobre la importancia de las energías renovables y la electromovilidad en la mitigación del cambio climático y la mejora de la calidad de vida.

En el contexto mexicano se han implementado diversas iniciativas para fomentar la participación ciudadana en la transición energética, tales como los comités de desarrollo sustentable en comunidades rurales y proyectos de energía comunitaria. Sin embargo, aún persisten desafíos significativos que requieren un esfuerzo concertado por parte de los gobiernos y las organizaciones de la sociedad civil. Entre estos desafíos se encuentra la falta de información y concienciación sobre los beneficios y oportunidades que ofrece la adopción de energías renovables y vehículos eléctricos.

La creación de espacios de diálogo y colaboración entre la ciudadanía, el Gobierno, la sociedad civil y el sector privado es esencial para garantizar una transición energética inclusiva y justa. Estos espacios pueden facilitar la identificación de las prioridades y preocupaciones de la población en relación con la transición energética, así como promover la cohesión social y el empoderamiento de las comunidades en la toma de decisiones energéticas.

Es imperativo reconocer y abordar las barreras que pueden limitar la participación ciudadana, como la desigualdad económica y social, el acceso limitado a recursos y servicios y la falta de confianza en las instituciones públicas. En este sentido, las políticas y programas de apoyo a la adopción de energías renovables y vehículos eléctricos deben ser diseñados de manera equitativa y justa, garantizando que los beneficios de la transición energética sean compartidos por todas las comunidades y sectores de la sociedad.

La promoción de la participación ciudadana también implica el fomento de la innovación y la colaboración en el desarrollo e implementación de soluciones energéticas sostenibles. Esto incluye la creación de redes de cooperación entre comunidades, empresas, instituciones académicas y de investigación y gobiernos para impulsar el intercambio de conocimientos, experiencias y tecnologías en materia de energías renovables y electromovilidad.

Por otro lado, la participación ciudadana en la transición energética debe ser impulsada mediante la implementación de mecanismos de gobernanza que garanticen la transparencia, la rendición de cuentas y la inclusión de las voces de la ciudadanía en la toma de decisiones energéticas. Esto puede incluir la creación de comités ciudadanos en los niveles local y regional, la realización de consultas y audiencias públicas y la promoción de la participación ciudadana en la formulación e implementación de políticas y programas de energía y electromovilidad.

Asimismo es fundamental garantizar el acceso a la información y la capacitación técnica para las comunidades y los individuos interesados en participar activamente en la transición energética. Esto puede lograrse mediante la creación de centros de capacitación y recursos en línea, la promoción de programas de formación y certificación en energías renovables y electromovilidad y la colaboración con instituciones académicas y de investigación para el desarrollo de cursos y talleres dirigidos a la ciudadanía.

La participación ciudadana en la transición energética también implica el empoderamiento económico de las comunidades y los individuos, lo que puede lograrse mediante la promoción de modelos de negocio y esquemas de financiamiento que faciliten la adopción de tecnologías de energía limpia y transporte eléctrico. Ejemplos de esto incluyen la implementación de programas de microcréditos y financiamiento para la adquisición de sistemas de energía renovable y vehículos eléctricos y la promoción de cooperativas

y empresas comunitarias que se dediquen a la generación y distribución de energía limpia y la prestación de servicios de movilidad sostenible. La participación ciudadana es un elemento crucial en la democratización de la energía y la transición hacia un sistema energético sostenible en México. Para garantizar una transición energética inclusiva y justa, es necesario promover la colaboración entre la ciudadanía, el Gobierno, la sociedad civil y el sector privado, así como garantizar el acceso a la información, la capacitación técnica y los recursos económicos necesarios para adoptar y gestionar soluciones energéticas sostenibles. Mediante el empoderamiento y la participación activa de la ciudadanía en la toma de decisiones energéticas, es posible avanzar hacia un futuro energético más limpio, eficiente y equitativo para todos los mexicanos.

Modelos de negocios y políticas públicas para la electromovilidad

La adopción de modelos de negocio innovadores y el desarrollo de políticas públicas adecuadas son esenciales para impulsar la electromovilidad y facilitar la democratización de la energía en México. Los modelos de negocio exitosos deberían enfocarse en la creación de valor para los usuarios, la promoción de la colaboración entre los distintos actores involucrados y la implementación de soluciones tecnológicas eficientes y sostenibles.

Algunos ejemplos de modelos de negocio innovadores en el ámbito de la electromovilidad incluyen las estaciones de carga multiusuario, que combinan la infraestructura de carga para vehículos eléctricos con servicios adicionales, como tiendas de conveniencia o cafeterías, y las redes de carga colaborativas, en las que los propietarios de infraestructura de carga comparten sus instalaciones con otros usuarios en plataformas digitales. Estos modelos pueden mejorar la accesibilidad y la rentabilidad de las estaciones de carga y promover la adopción de vehículos eléctricos entre la población.

Además de esto, el desarrollo de políticas públicas que fomenten la electromovilidad y la democratización de la energía es fundamental para garantizar un entorno propicio para la inversión y la innovación en el sector. Estas políticas pueden incluir incentivos fiscales y económicos para la ad-

quisición de vehículos eléctricos y la instalación de infraestructura de carga, la promoción de la investigación y el desarrollo tecnológico en energías renovables y electromovilidad y la implementación de programas de educación y capacitación para la formación de recursos humanos especializados.

En México, algunas iniciativas gubernamentales han buscado impulsar la electromovilidad y la democratización de la energía, como el Programa de Desarrollo del Sistema Eléctrico Nacional (Prodesen) y la Ley de Transición Energética (LTE). Sin embargo, se requiere un mayor compromiso por parte de los gobiernos y la sociedad civil para desarrollar e implementar políticas públicas integrales y efectivas que faciliten la transición hacia un sistema energético sostenible y equitativo. La democratización de la energía y la adopción de la electromovilidad en México dependen de la combinación de diversos factores, como la descentralización y el acceso a energías renovables, la participación ciudadana en la transición energética y el desarrollo de modelos de negocio y políticas públicas adecuadas. La colaboración entre los diferentes actores involucrados y la promoción de soluciones tecnológicas sostenibles e innovadoras serán fundamentales para alcanzar un futuro energético más limpio, eficiente y democrático en el país.

Conclusión

La electromovilidad en México se encuentra en un punto de inflexión, un momento crítico donde las decisiones que tomemos hoy repercutirán en el legado que dejamos para las generaciones futuras. Este informe ha explorado la complejidad y la multidimensionalidad de la electromovilidad, desde la infraestructura y la tecnología hasta la participación ciudadana y la democratización de la energía. La realidad es clara: estamos ante una oportunidad única para redefinir el paradigma del transporte y la energía en México, pero también ante desafíos que requieren de una acción concertada, innovadora y, sobre todo, comprometida. A continuación se enlistan algunas recomendaciones estratégicas para fomentar una electromovilidad sostenible:

- *Inversión en infraestructura robusta*: No basta con incrementar el número de estaciones de carga; necesitamos una red de carga inteligente, interconectada y resiliente que se adapte a las fluctuaciones de la demanda y que integre fuentes de energía renovable.
- *Políticas de incentivos personalizadas*: Más allá de los incentivos fiscales genéricos, se deben diseñar políticas que aborden las necesidades específicas de diferentes grupos demográficos y regiones geográficas del país. Esto incluye incentivos para la adopción de vehículos eléctricos en sectores como el del transporte público y las flotas de empresas.
- *Educación y concienciación profunda*: No se trata sólo de informar, sino de transformar la cultura ciudadana en torno a la sostenibilidad. Esto implica la integración de la educación en electromovilidad en los currículos escolares y la concienciación a largo plazo mediante campañas dirigidas a los múltiples sectores de la población.
- *Generación distribuida y microrredes como eje central*: Estas tecnologías deben ser promovidas no sólo como proyectos piloto, sino como modelos a seguir. Se deben establecer alianzas público-privadas para financiar estos proyectos y se deben crear incentivos para que las comunidades participen activamente en ellos.
- *Participación ciudadana como pilar de la democratización energética*: La creación de comités ciudadanos y plataformas de participación digital pueden ser herramientas efectivas para involucrar a la ciudadanía en la toma de decisiones, desde el diseño hasta la implementación de políticas de electromovilidad.
- *Modelos de negocio que rompan paradigmas*: La innovación debe ser la norma, no la excepción. Desde estaciones de carga que funcionen como centros comunitarios hasta plataformas colaborativas que permitan el uso compartido de vehículos eléctricos, el límite es nuestra imaginación.
- *Capacitación especializada y desarrollo de talento*: No podemos subestimar la importancia de tener un capital humano altamente capacitado. Esto implica no sólo la formación técnica, sino también la formación en habilidades blandas como la gestión de proyectos y la toma de decisiones éticas.

- *Transparencia, rendición de cuentas y evaluación continua:* Cada política, cada proyecto deben ser sometidos a un escrutinio riguroso. Esto no sólo mejora la eficacia de las intervenciones, sino que también fortalece la confianza pública en las instituciones.

La electromovilidad no es una meta aislada, sino un componente esencial de una visión más amplia para un México sostenible, inclusivo y próspero. Este no es un desafío que pueda ser abordado en silos; requiere de una estrategia integral y, sobre todo, de la voluntad colectiva para actuar. En este sentido, cada uno de nosotros, desde el ciudadano común hasta el más alto funcionario público, tiene un papel que desempeñar. La pregunta no es si la electromovilidad es viable en México; la verdadera pregunta es si estamos dispuestos a hacer los sacrificios y tomar las decisiones difíciles que esta transición requiere. Con estas reflexiones invitamos a cada uno de ustedes, amables lectores, a no ser meros espectadores de este cambio, sino actores comprometidos en la construcción de un futuro que, aunque lleno de desafíos, está también repleto de posibilidades infinitas.

Agradecimientos

El presente capítulo se realizó gracias al apoyo del fondo Fordecyt-Pronaces, convocatoria 2021-2024 (FOP04-2021-03) del Conahcyt en el marco de los proyectos número 315 324 y número 319 195.

Bibliografía

- AMDEE. (2023). *El viento en números*. <https://amdee.org/el-viento-en-numeros.html>
- Balance Nacional de Energía | Secretaría de Energía | Gobierno | gob.mx*. (n.d.). Consultado el 27 de agosto de 2023 de: <https://www.gob.mx/sener/documentos/balance-nacional-de-energia-2019>
- Diario Oficial de la Federación. (2013). *Segunda Edición DOF*.
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). (n.d.). Consultado el 27 de agosto de 2023 de: <https://www.inegi.org.mx/>
- Ileri, L.-T. L., Enrique, R.-A., Antonio, G.-G. J., Arturo, M.-P., y Marx, C.-C. G. (2019). Smart

- Grids en México: Situación actual, retos y propuesta de implementación Smart Grid in Mexico: Current situation, challenges and implementation. *Ingeniería Investigación y Tecnología*, 20(2), 1–12.
- OECD *Environmental Performance Reviews: France 2016*. (2016). <https://doi.org/10.1787/9789264252714-EN>
- Programa para el Desarrollo del Sistema Eléctrico Nacional | Secretaría de Energía | Gobierno | *gob.mx*. (n.d.). Consultado el 27 de agosto de 2023 de: <https://www.gob.mx/sener/articulos/programa-para-el-desarrollo-del-sistema-electrico-nacional>
- PROMÉXICO, GIZ, y IER-UNAM. (2017). *La industria solar fotovoltaica y fototérmica en México*.
- Secretaría de Energía. (2013). *Prospectiva de Petróleo Crudo y Petrolíferos 2013-2027*.
- . (2023). Programa de Desarrollo del Sistema Eléctrico Nacional 2023-2037. *Gob.mx*. <https://www.gob.mx/sener/articulos/programa-de-desarrollo-del-sistema-electrico-nacional-2023-2037>
- Secretaría de Gobernación. (2015). *La energía eólica en México: Una perspectiva social sobre el valor de la tierra*. <https://www.gob.mx/segob/documentos/la-energia-eolica-en-mexico-una-perspectiva-social-sobre-el-valor-de-la-tierra>
- SENER. (2020). *Balance Nacional de Energía 2020*. [moz-extension://f83fc229-3cbe-4e5a-8a72-bd580a30dc32/enhanced-reader.html?openApp&pdf=https%3A%2F%2Fwww.gob.mx%2Fcms%2Fuploads%2Fattachment%2Ffile%2F707654%2FBALANCE_NACIONAL_ENERGIA_0403.pdf](https://www.gob.mx/sener/articulos/balance-nacional-de-energia-2020)
- Villavicencio, D. H., y Millan, J. C. (2020). La transición energética en México: disyuntivas, tensiones y avances en la ejecución del proyecto nacional. *Http://Journals.Openedition.Org/Caravelle*, 115(115), 25–40. <https://doi.org/10.4000/CARAVELLE.8635>
- Zagorodny, J. P. (2023). *Gestión integral de las baterías fuera de uso de vehículos eléctricos en el marco de una estrategia de economía circular*. <https://repositorio.cepal.org/handle/11362/48838>

X. Sistemas híbridos basados en energía renovable como posible solución al déficit de electrificación en México

ÁNGEL OSWALDO GAMA CAMACHO*

KELLY JOEL GURUBEL TUN**

ALBERTO CORONADO MENDOZA***

NATALIA NAVAL MARTÍN****

DOI: <https://doi.org/10.52501/cc.178.10>

Resumen

Este capítulo tiene como objetivo mostrar un panorama más a fondo del concepto de *pobreza energética*, analizando las diferentes aristas que este problema implica. Se estudia cómo éste se manifiesta en México y el mundo, las diferentes acciones de mitigación de los países y algunas propuestas de implementación novedosas aplicadas hoy en día, como los sistemas híbridos de generación energética. Estos sistemas presentan propiedades y ventajas que los colocan en un terreno promisorio para aplicación en proyectos sociales en zonas rurales, rumbo a un futuro sustentable que garantice el bienestar y calidad de vida de las personas.

Palabras clave: *Pobreza energética, déficit, sistemas híbridos de generación.*

* Licenciado en Física. Departamento de Estudios de Agua y la Energía, Centro Universitario de Tonalá, Universidad de Guadalajara, México.

** Doctor en Ciencias. Departamento de Estudios de Agua y la Energía, Centro Universitario de Tonalá, Universidad de Guadalajara, México. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9999-9018>

*** Doctor en Energías Renovables y Eficiencia Energética. Departamento de Estudios de Agua y la Energía, Centro Universitario de Tonalá, Universidad de Guadalajara, México. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6283-4911>

**** Doctora en Energías Renovables y Eficiencia Energética. Escuela de Ingeniería y Arquitectura, Universidad de Zaragoza, España.

Introducción

En la actualidad existe una imperiosa necesidad de los países por incrementar su matriz energética y adoptar fuentes alternativas de generación dadas las desventajas que presentan las fuentes convencionales, como las provenientes de combustibles fósiles. Estas desventajas engloban desde aspectos de sustentabilidad, como la limitación del recurso a largo plazo y la inestabilidad en los procesos de generación, hasta aspectos de carácter crítico para el planeta, como la contaminación del aire, el calentamiento global y el cambio climático (Natividad y Benalcázar, 2023).

Por otro lado, se presencia un fenómeno político y social del cual se conoce mucho menos de lo que se debería: la pobreza energética. A lo largo de la historia se han dado distintos enfoques acerca de este término. En general se habla de una insatisfacción de las necesidades básicas relacionadas con el acceso de la energía que garantizan la preservación del bienestar físico y mental de las personas. Aunado a ello, se puede vincular la pobreza energética con el acceso a la educación y a un empleo, los cuales impactan en la calidad de vida. Si bien es cierto que la pobreza energética representa un problema mundial de suma importancia, el enfoque energético es sólo una de las tantas caras que tiene el término *pobreza*. Sin embargo, en este capítulo nos centraremos únicamente en analizar la pobreza energética y las ramificaciones que ésta conlleva.

Hoy en día nos resulta natural pensar en todos los dispositivos y tecnologías que tenemos e implementamos en nuestros hogares ya de manera automática, dando por sentado que son esenciales y necesarios en las actividades cotidianas. Servicios como el acceso a la electricidad, al agua, al gas LP para cocción de alimentos e higiene personal, a lavadoras automáticas dispositivos que ayudan a climatizar un área determinada según convenga, e incluso a los de simple entretenimiento como la televisión, son algunos de los que, para las personas que vivimos en la metrópolis, resultan imprescindibles. En realidad es complicado imaginar cómo sería nuestra vida si no tuviéramos alguno de esos servicios al alcance y qué tendríamos que hacer para reemplazar su ausencia. Sin embargo, este escenario de pobreza lo viven millones de personas en el mundo, a tal grado que en

ciertas zonas han pasado vidas y generaciones enteras sin gozar de un bienestar.

A partir de lo anterior podemos inferir una serie de necesidades que son imprescindibles para realizar actividades cotidianas con normalidad y tener una calidad de vida importante en términos de salud física y mental, como se muestra a continuación (CONUEE, 2022).

Medición de la pobreza energética

En general se habla de un nivel de pobreza cuando las personas no satisfacen al menos una de las necesidades mencionadas anteriormente. En términos de energía, el acceso a la electricidad es el principal indicador de pobreza y éste genera impactos directos en otras áreas, como la alimentación, el confort térmico, el entretenimiento y los servicios de educación y salud.

Existen diversos enfoques que ayudan a medir el estado de pobreza energética en un determinado lugar, teniendo en cuenta el supuesto de que las personas cuentan con una vivienda; por ejemplo, se puede decir que se experimenta pobreza energética si la temperatura interna en la vivienda es menor a los 18 °C (enfoque de temperaturas).

Por otro lado, en Reino Unido se toma en cuenta que el porcentaje máximo de gasto de ingreso neto para servicios de energía no puede exceder 10% (enfoque basado en gasto y renta de hogares).

Otro indicador de pobreza energética se toma usando el enfoque basado en respuestas directas de los habitantes de una vivienda acerca de la capacidad de mantener los suministros básicos, como agua, electricidad, gas, teléfono, etcétera. Se dice que un hogar presenta pobreza energética cuando se tiene una recurrencia en atrasos de pagos de servicios básicos (DECC, 2022).

Aspectos varios de la pobreza energética

Impacto en la salud

Este estado de carencia genera efectos negativos en la salud de las personas, tanto física como mentalmente. Uno de los principales efectos naturales que hay que pensar es la dependencia de cierta población a equipos electrónicos para su preservar su salud (en el caso de que, de alguna manera, se les proporcione por algún medio la atención y el equipamiento necesario), pues el acceso a la electricidad determina una delgada línea entre preservar o atentar contra la salud propia.

Otro aspecto de la pobreza energética que impacta directamente en la salud es el uso de combustibles como la madera, el carbón y el queroseno para cocción de alimentos. En el informe del estado de acceso de servicios de energía modernos para cocción del Banco Internacional para la Reconstrucción y el Desarrollo, en un estudio que involucró a 71 países alrededor del mundo, se detalló la falta de acceso a tecnologías modernas para cocinar alimentos, como se muestra en la tabla 1 (ESMAP, 2020).

Tabla 1. Acceso a las tecnologías modernas para cocción de alimentos en regiones en desarrollo

Zona o región	Porcentaje de inaccesibilidad (%)
Latinoamérica y el Caribe	44
África subsahariana	90
Sur de Asia	73
Sureste de Asia	79

Fuente: Energy Sector Management Assistance Program (2020).

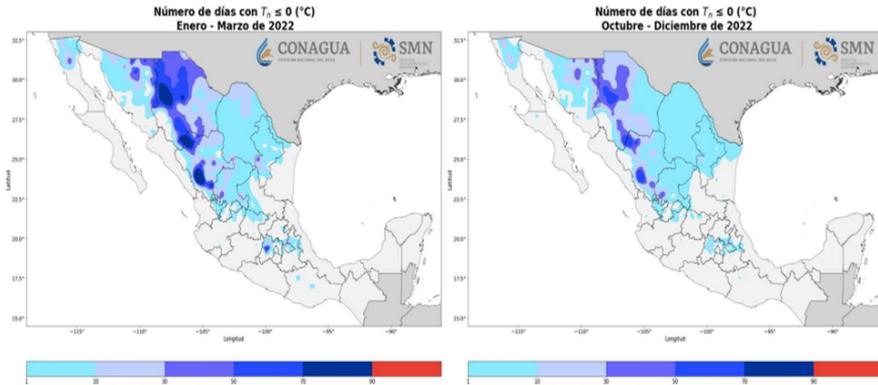
De acuerdo con la Encuesta Nacional sobre Consumo de Energéticos en Viviendas Particulares 2018, se obtuvo que 11% de la población en México utiliza como combustible la leña o el carbón. Lo anterior representa un peligro potencial para amas de casa, niños y adultos mayores debido a la inhalación de gases nocivos, ya que ellos son los que pasan mayor tiempo dentro del hogar (INEGI, 2018).

Por otro lado, el control de la temperatura en las viviendas resulta un tema estrechamente relacionado con la salud, ya que existen periodos en el año durante los cuales esta variable puede presentar valores extremos. Un ejemplo claro son las altas temperaturas vividas en zonas de África, que llegan a superar los 40 °C durante el verano, principalmente en la región central y subsahariana. Estas temperaturas representan riesgo de deshidratación y enfermedades cefaleas. En contraste, los periodos gélidos que experimentan los países cercanos a los polos también representan un riesgo para la salud humana en cuestión de enfermedades respiratorias, debido a que la temperatura promedio necesaria para un confort en las viviendas oscila entre los 18 y 24 °C (CONUEE, 2022).

Localmente en México se experimentan anualmente fenómenos similares (guardando proporción con lo anterior) tanto en el norte como en el sur del país, en los cuales se presentan temperaturas cercanas a los 38 °C durante el verano y bajo cero en temporada invernal. Un ejemplo de ello se vive en los Estados de Sonora y Guerrero (figura 1), en los cuales es notorio que durante los meses de primavera y verano la temperatura alcanza valores mayores a los 35 °C. En 2022, la temperatura media nacional fue de 22 °C, lo cual ubicó a éste como el octavo año más cálido desde 1953, con el mes de julio como el más cálido, con una temperatura media de 26.6 °C. Los Estados que experimentaron las mayores temperaturas fueron Sinaloa, Nayarit, Jalisco, Colima, Michoacán, Guerrero, Veracruz, Tabasco, Campeche, Yucatán y Quintana Roo, con un rango de entre 25 y 30 °C.

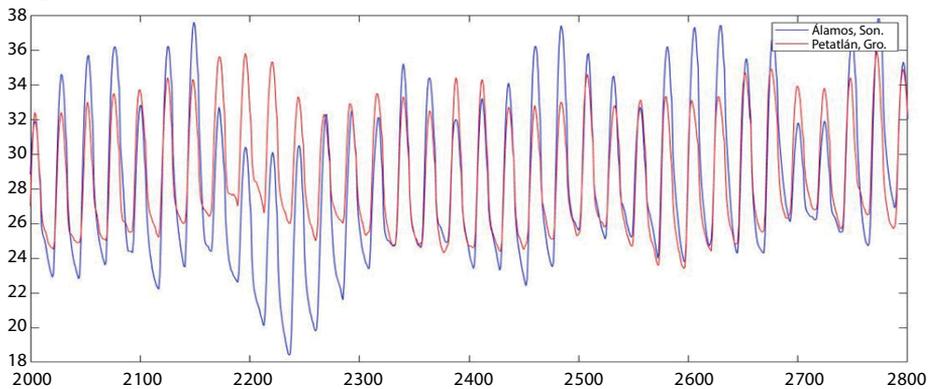
Por otro lado, los periodos de enero-marzo y octubre-diciembre son aquellos en los que se presentan las temperaturas más bajas en el año en algunos Estados como Chihuahua y Durango, donde se registraron más de 70 días con temperaturas menores a los 0 °C, mientras que en Estados como Baja California, Sonora, Coahuila, Zacatecas, Nuevo León y Estado de México hubo de 10 a 30 días con dichas condiciones (Conagua, 2022).

Figura 1. Cantidad de días con temperaturas bajo cero por Estado



Fuente: Guerrero (2021).

Figura 2. Variación de temperatura en las comunidades de Álamos, Son., y Petatlán, Gro. (2021)



Fuente: National Renewable Energy Laboratory (NREL) (2021).

Accesibilidad a la electricidad

Se sabe que, para el año 2020, el porcentaje de cobertura en el mundo era de 90.4%. Sin embargo, de acuerdo con un informe de la Agencia Internacional de Energía, entre 2020 y 2022, el déficit incrementó 3%, por lo cual se prevé un atraso en el cumplimiento de la meta de acceso universal planteada para el año 2030, en el objetivo de desarrollo sostenible número 7 de la Organi-

zación de las Naciones Unidas. A este paso, se estima que en 2030 cerca de 660 000 000 de personas en el mundo sigan sin acceso a este recurso, de las cuales 85% se encuentran en África subsahariana (IEA, 2022). De estos países, 10 de ellos presentan un porcentaje de accesibilidad menor a 30%.

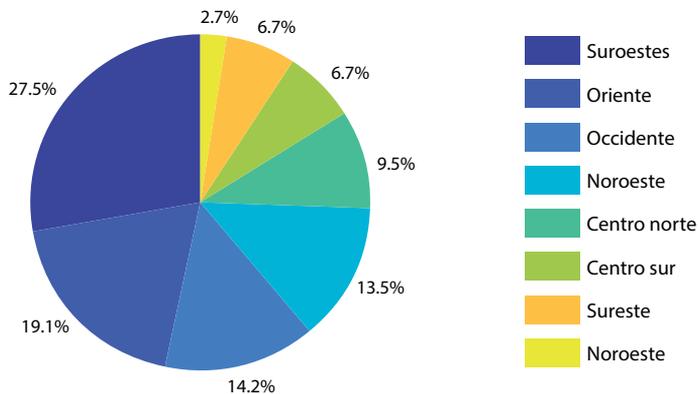
Tabla 2. *Porcentajes de accesibilidad a la electricidad más bajos en el mundo*

<i>País</i>	<i>Porcentaje de accesibilidad</i>
República Centroafricana	15.5
Malawi	14.9
Burundi	11.7
Chad	11.1
Sudán del Sur	7.2

Fuente: Banco Mundial (2020).

Particularmente en México, en 2021 fue lograda una meta de 99.21% de cobertura del recurso, lo cual significó un aumento de 0.13% respecto al año anterior. Sin embargo, aún se tienen identificados 1 015 302 habitantes cuyos hogares hay que electrificar, de los cuales el porcentaje mayor se encuentra en las regiones suroeste, oriente, occidente y noroeste (figura 3). Los datos anteriores en realidad son contrastantes cuando se piensa en países potencia como Alemania, Brasil, China y Estados Unidos, los cuales han logrado una cobertura total en el servicio.

Figura 3. *Déficit de electrificación en México por región*



Fuente: CFE (2021).

Algunas acciones y programas de mitigación

En general, las acciones que han realizado los gobiernos alrededor del mundo acerca del problema de pobreza energética engloban políticas de precio, renta y eficiencia energética. Países de la Unión Europea, como Reino Unido, Francia e Italia, han implementado descuentos en las tarifas de servicios de gas y electricidad a consumidores vulnerables. Por su parte, existen políticas de bonos o pagos que tienen que ver con la temperatura a la que puede llegar la vivienda, como el *Cold Weather Payment (CWP)* en Reino Unido, el cual aplica a consumidores vulnerables en zonas donde se prevé que la temperatura baje más allá de los 0 °C por siete días o más.

Otro tipo de políticas toman en cuenta la edad y los ingresos de los individuos; por ejemplo, en Alemania se realiza una renta complementaria en hogares cuyos miembros no alcanzan un determinado umbral de ingresos, mientras que en Reino Unido se cuenta con un pago directo en cuenta a los hogares con un miembro mayor de 60 años. Por su parte, Francia ha implementado políticas integrales centradas en mejoras a la eficiencia energética en viviendas (Antepara, 2022).

En el continente americano, países como Uruguay han planteado objetivos de electrificación a sectores en pobreza extrema a partir de extensiones en la red de distribución. En Colombia se han propuesto tarifas adaptables a la capacidad de pago de consumidores vulnerables, mientras que en El Salvador se han aplicado subsidios en gas para cocinar. Por su parte, Guatemala cuenta con subsidios al costo de la energía y categorización de consumidores (European Commission, 2016)

Localmente el Fondo de Servicio Universal Eléctrico (FSUE), como rostro social de la reforma energética, se puso en marcha en 2017 con la finalidad de dotar del servicio de electricidad a comunidades aisladas, de las cuales 75% serían atendidas mediante extensiones de las líneas de distribución y el porcentaje restante mediante sistemas fotovoltaicos aislados. Las comunidades consideradas en la electrificación se dictaminan bajo ciertos criterios que se especifican dentro de las convocatorias públicas nacionales que lanza el FSUE. Algunos de los criterios descritos en dichas convocatorias engloban aspectos como la definición de comunidad rural, zona

urbana marginada o que se realice la solicitud para un proyecto productivo comunitario, inclusive la distancia de la localidad a la red de distribución (INECC, 2021).

Durante las convocatorias de 2021 y 2022, se registraron 814 solicitudes de electrificación mediante sistemas de energía renovable distribuidas en 28 Estados de la república, de las cuales el mayor déficit se encuentra en las regiones noroeste, suroeste y occidente.

¿Propuesta renovable de erradicación en México?

De acuerdo con el informe de electrificación rural presentado por la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (Semarnat), en conjunto con el Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC) en 2021, las estrategias de electrificación con sistemas fotovoltaicos aislados consideraron el tipo de edificación: casa habitación, centro educativo y centro de salud. Para el caso de las viviendas, se consideró la instalación de un módulo solar individual de 300 W, para suministrar energía eléctrica a casas de 48 m² con sala, comedor y dos recámaras, con consumos de al menos 750 Wh y radiación solar de cuatro a cinco horas diarias. Además del módulo, el sistema toma en cuenta otros elementos, como los acondicionadores de potencia (inversores, controladores de carga y protecciones) y un sistema de almacenamiento de energía a partir de baterías (sin especificar el dimensionamiento), las cuales se reemplazarían cada cuatro años. Los dispositivos y electrodomésticos que el sistema sería capaz de alimentar, la cantidad y los consumos individuales se muestran en la tabla 3 (INECC, 2021).

El sistema de generación se visualizó con una vida útil de más de diez años de acuerdo con las garantías de los fabricantes. Lo anterior beneficiaría a las personas con pobreza energética del listado de las convocatorias, ya que les brindaría un sistema de generación a partir de energía limpia y por ende libre de emisiones de dióxido de carbono (CO₂), con mantenimiento mínimo de componentes, así como una instalación rápida y sencilla.

Tabla 3. *Dispositivos y electrodomésticos que puede alimentar una microrred aislada solar-batería*

<i>Equipo</i>	<i>Cantidad</i>	<i>Potencia (W)</i>	<i>Horas de uso</i>	<i>Potencia total (W)</i>	<i>Consumo (Wh/día)</i>
Iluminación	4	11	4.00	44	176
Ventilador	1	60	3.00	60	180
Minicomponente	1	50	2.00	50	100
Radio portátil	2	15	3.50	30	105
Licuadaora	1	600	0.08	600	49.8
Televisión LED 21	1	30	3.00	30	90
Dispositivo recargable	2	5	4.00	10	40
Total		791		824	740.8

Fuente: Elaboración propia.

La tabla 3 nos brinda un panorama de lo que sería la carga de consumo mínima que debería tener una vivienda para mejorar la calidad de vida de las personas. En el informe se mencionan tres tipos de consumos para viviendas (bajo, medio y alto), los cuales corresponden a 741926 y 1 112 Wh/día, respectivamente. Sin embargo, no se especifica dentro del documento a qué se refiere la diferencia entre los tres consumos propuestos. Esta clasificación resulta complicada de entender desde un punto de vista en que, si se estuviera buscando una homogeneidad entre las viviendas en cuanto a electrificación, no debería existir una diferencia de consumos entre una u otra vivienda. En dado caso, se tendría que evaluar cuál es la tecnología que se puede implementar de mejor manera para cada zona del país en función del recurso renovable con el que se cuente, y no hacer brechas entre estas, ya que el recurso no es igualmente abundante en todas las regiones. La demanda mínima por consumir en una vivienda, en la cual sus habitantes sufren de pobreza energética, tiene que ser equitativa o, por lo menos, estar ligada a las características de la localidad y atender de manera óptima las necesidades de bienestar de las personas.

De la tabla 3 destacan algunos aspectos, como el hecho de considerar una lámpara para iluminación por cuarto, pero no se considera una para el cuarto de baño ni una en la parte exterior de la vivienda. Por otro lado, es llamativo el hecho de considerar algunos dispositivos que corresponden a equipos destinados para entretenimiento (minicomponente y radio portátil), los

cuales quizá impactan en el bienestar de las personas, pero están un escalón por debajo de otras necesidades que podrían considerarse más esenciales, como la conservación de alimentos o el confort térmico en la vivienda. Si bien es cierto que los equipos destinados a satisfacer estas necesidades (refrigerador y calefactor para temporada invernal) en general son de alto consumo, se podrían buscar alternativas económicas que no representen un reto inalcanzable en cuestión financiera y energética, ya que en el balance costo-beneficio resultan imprescindibles los puntos mencionados.

Debido a lo anterior, resulta necesario proponer una nueva demanda eléctrica que sea compuesta por los dispositivos antes mencionados y que tendrá un perfil diferente en el periodo de verano que en el invernal, debido a la implementación de diferentes dispositivos en cada época; además, hay que considerar dispositivos utilizados en actividades económicas, como la agricultura, ya que en la estructura social estas actividades son las que justifican los proyectos de esta índole. En la tabla 4 se muestra la demanda propuesta para ambos periodos y el consumo de los equipos necesarios (Samikannu *et al.*, 2022)

Tabla 4. *Dispositivos considerados en la demanda eléctrica y sus respectivos consumos (primavera-verano)*

<i>Equipo</i>	<i>Cantidad</i>	<i>Potencia (W)</i>	<i>Horas de uso</i>	<i>Potencia Total (W)</i>	<i>Consumo (Wh/día)</i>
Lámparas	6	15	14	90	1260
Ventilador ¹	1	60	9	60	540
Televisión LED 32	1	150	7	150	1050
Refrigerador	1	220	24	220	5280
Licuadaora	1	600	0.1	600	60
Dispositivo recargable	2	12	9	24	216
Bomba de riego	2	373	3	746	2238

Nota: Para la temporada otoño-invierno, el uso del ventilador se reemplazaría por un calefactor de 700 W.
Fuente: Elaboración propia.

Ahora bien, aunque es cierto que este tipo de energías representan una alternativa viable para conseguir los objetivos planteados globalmente, también existen ciertas complicaciones. La naturaleza de las fuentes hace que existan intermitencias y no linealidades en la eficiencia de los sistemas,

debido principalmente a factores atmosféricos (Ronay *et al.*, 2017). Variaciones en magnitudes como la temperatura, presión atmosférica, altura, nubosidad, humedad relativa y en la dirección del viento generan intermitencias en la generación de energía eólica. Por su parte, factores como la ubicación geográfica, la periodicidad de la irradiancia solar en la Tierra y el ángulo de incidencia de ésta impactan directamente en la generación de energía vía solar, como la fotovoltaica, y la concentración solar (Silvera *et al.*, 2021).

Por otro lado, el hecho de considerar una demanda de consumo como la que se muestra en la tabla 4 e involucrar una sola tecnología para generación de energía implicaría un sobredimensionamiento y, por tanto, un aumento en el costo de inversión del proyecto.

Debido a lo anterior, se ha optado por implementar sistemas de generación híbridos, los cuales involucren dos o más fuentes de energía para complementar la ausencia de una u otra fuente individual y, con ello, asegurar el cumplimiento de demanda eléctrica (Mustafa *et al.*, 2022). Esta implementación involucra el desarrollo de estrategias que involucren modelos de optimización de alto rendimiento y herramientas predictivas que garanticen el cumplimiento de ciertos objetivos técnicos y económicos en un cierto periodo de tiempo y permitan el diseño de escenarios del comportamiento a futuro del sistema para prever soluciones concretas. En particular, el país posee gran recurso tanto eólico como solar, por lo cual resulta lógico pensar en que la implementación de este tipo de redes para mitigación del déficit podría funcionar.

Sistemas híbridos basados en energía renovable

El término *sistema híbrido* describe una red a pequeña escala que integra diferentes tecnologías que aprovechan fuentes de energía tanto convencional como renovable, además de dispositivos auxiliares que garantizan la satisfacción de la demanda. En general, este tipo de sistemas son implementados en comunidades rurales que tienen un acceso limitado o nulo a la electricidad. Sin embargo, recientemente se ha implementado este tipo de sistemas en puntos urbanos con interconexión a la red eléctrica. A grandes rasgos, los componentes de una microrred híbrida son los siguientes:

- Tecnologías de aprovechamiento de fuentes convencionales.
- Tecnologías de aprovechamiento de fuentes renovables.
- Tecnologías de almacenamiento de energía.
- Dispositivos de conversión de corriente directa a corriente alterna.

Esta hibridación incrementa la estabilidad y la fiabilidad del sistema en un periodo de tiempo determinado al cumplir con una cierta demanda gracias a la complementariedad entre tecnologías. Además de lo anterior, utilizar una red híbrida permite tener lapsos de operación del sistema en los cuales la potencia generada resulta mayor a la requerida por la demanda. En estos periodos, los sistemas de almacenamiento de energía resultan cruciales, dado que permiten realizar un manejo inteligente de la energía y tener un control de ésta en función de la aplicación que se esté proyectando.

Tecnologías de almacenamiento

Existe una gran variedad de sistemas de almacenamiento aplicables a este tipo de microrredes, los cuales se pueden clasificar por el modo de conversión de energía:

- Sistemas mecánicos (aire comprimido, volantes de inercia, bombeo hidráulico).
- Sistemas eléctricos (supercapacitores, superconductores magnéticos).
- Sistemas electroquímicos (baterías de ion-litio y flujo).
- Almacenamiento de hidrógeno.

Sistemas híbridos eólico-solar (PV-WT)

Al considerar un sistema híbrido basado en tecnologías solar fotovoltaica y eólica, se incrementa la eficiencia de este ampliamente, ya que en general ambas fuentes de energía son complementarias: la solar fotovoltaica está durante gran parte del día y la energía eólica durante la noche, cuando la

velocidad del viento es mayor que en el día (aunque durante el día también se contará con la aportación de dicha energía).

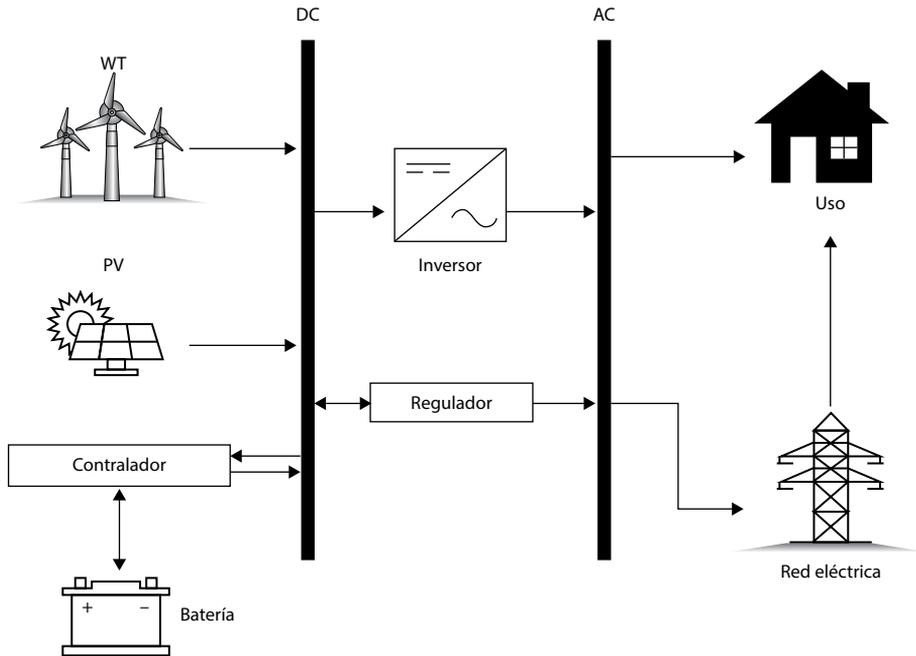
Por otro lado, aunque estas tecnologías son relativamente maduras y su uso en conjunto incrementa en gran medida la eficiencia del sistema, al combinarlas existe intermitencia por lo dicho anteriormente, lo cual vuelve crítico el realizar un control energético y de dimensionamiento para garantizar la operación óptima del sistema a fin de minimizar los costos de instalación, operación y mantenimiento. Cabe señalar que este tipo de sistemas por lo general es analizado en conjunto con un banco de baterías, un generador diésel o bien una interconexión a la red de suministro, para garantizar el cumplimiento en la demanda energética (Al-Ghussain y Taylan, 2021).

Sistemas híbridos eólico-solar-almacenamiento por baterías (PV-WT-BAT)

Para este tipo de sistemas, en los cuales únicamente se cuenta con la aportación de la energía solar y eólica, resulta crucial el hecho de tener un sistema de almacenamiento; el más común de estos son las baterías de ion-litio. La implementación de un sistema de baterías reduce la inestabilidad intrínseca de las fuentes de energía. El sistema de almacenamiento retiene la energía excedente respecto a la demanda (principalmente, en los periodos en que se tiene un consumo bajo) y la suministra cuando no existe generación o ésta no satisface la demanda.

En el caso de sistemas interconectados a la red, además de los beneficios anteriores, las baterías permiten tener un control en cuánto a despacho económico se refiere, ya que el usuario decide almacenar en lapsos de tarifa baja e inyectar la energía a la red en lapsos de tarifa alta, con lo cual se obtiene un beneficio económico importante, además de tener siempre el sustento de la red en caso de necesitarlo. En la figura 4 se muestra el esquema de un sistema PV-WT-BAT con interconexión a la red eléctrica (Agajie *et al.*, 2023).

Figura 4. Esquema simple de un sistema híbrido PV-WT-BAT

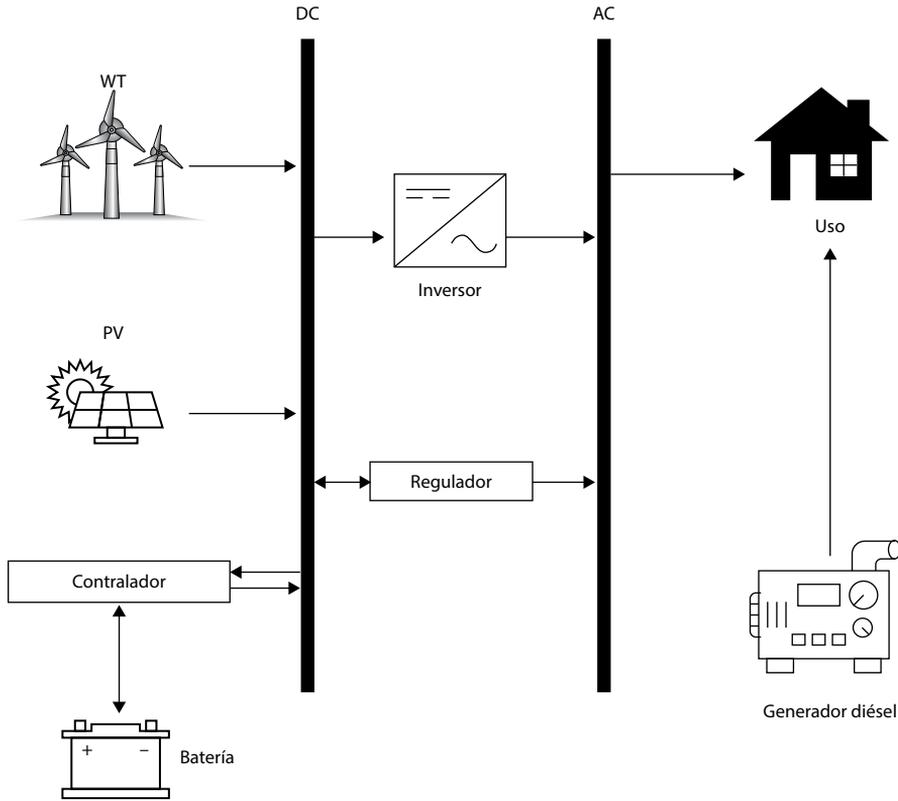


Fuente: Elaboración propia.

Sistemas híbridos eólico-solar-diésel-almacenamiento por baterías (PV-WT-DG-BAT)

Este tipo de sistemas, por lo general, se implementan en situaciones aisladas, ya que la incorporación de una fuente convencional, como el generador diésel, sustituye la necesidad de una interconexión a la red. De igual manera, el objetivo de su incorporación es suprimir los puntos de insatisfacción de la demanda, lo cual en la realidad sucede frecuentemente en este tipo de sistemas. Aunque resulta una solución viable en términos de cumplimiento de demanda, no lo es en términos de uso de fuentes no convencionales y reducción de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) (figura 5).

Figura 5. Esquema simple de un sistema híbrido PV-WT-DG-BAT

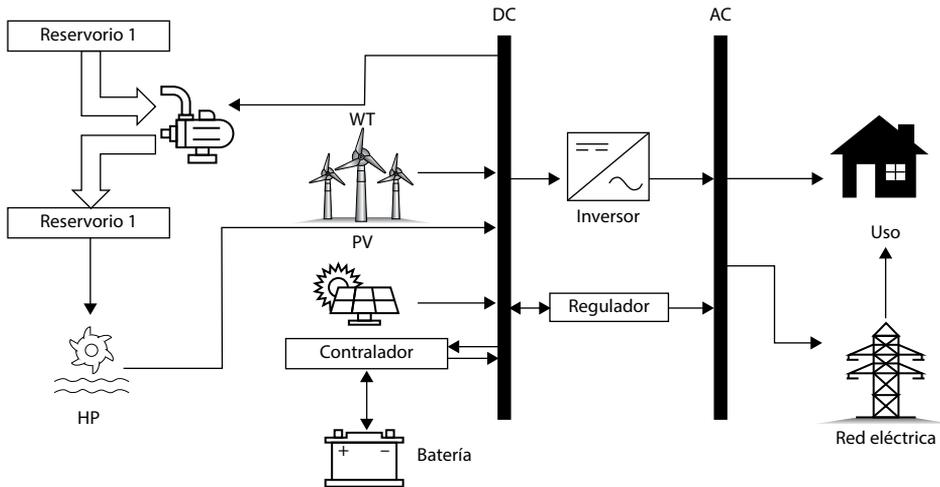


Fuente: Elaboración propia.

Sistemas híbridos eólico-solar-bombeo hidráulico (PV-WT-HP)

La combinación entre la energía solar, eólica y el bombeo hidráulico resulta beneficiosa principalmente en sistemas aislados, en los cuales la incorporación del bombeo puede mitigar la necesidad de un generador diésel y complementa los periodos en los que no existe gran generación por parte de la energía solar y eólica (figura 6). Si el sistema se encuentra interconectado, de manera análoga a las baterías, se podrá almacenar energía para venderla en periodos de tarifa alta (Agajie *et al.*, 2023).

Figura 6. Esquema simple de un sistema híbrido PV-WT-HP



Fuente: Elaboración propia.

Casos de estudio en el mundo

Alrededor del mundo existen diversos países que han implementado este tipo de sistemas en zonas rurales con escaso acceso a la electricidad. Un ejemplo de ello es el estudio mostrado por Wesley *et al.* (2020), en el cual se analiza la implementación de un sistema híbrido PV-WT-BAT en zonas rurales de Haití. Como es sabido, este país situado en el Caribe presenta alto grado de déficit de electrificación con aproximadamente 5% de acceso en estas zonas y un índice de desarrollo humano (IDH) bajo, de 0.493. Además, este país depende en su mayoría de la generación de energía a partir de combustibles fósiles y biomasa.

Se realizó un análisis del recurso disponible en zonas vulnerables y se encontró que la irradiación solar promedio es de 5.26 kWh/m²/d, mientras que la velocidad del viento promedio mensual, dentro de un periodo de análisis de 20 años, fue de 6.04 m/s a una altura de 50 m, los cuales son valores de recurso con alto potencial de utilización. Con estos datos se realizó la simulación del sistema considerando diversas combinaciones de tecnologías, para encontrar el dimensionamiento óptimo que minimice el costo de la

energía. Se encontró que el costo de la energía fue de 0.477 US\$/kWh, menor al costo del diésel en el país; por lo cual esta solución resulta viable para implementarla como un sistema de generación de energía en zonas rurales, donde sus habitantes puedan aumentar su bienestar y calidad de vida.

Otro país que ha analizado la implementación de sistemas PV-WT-BAT es Camerún, particularmente en la ciudad de Mbouda. Fosso *et al.* (2023) estudian este tipo de sistemas como solución a una demanda compuesta por los servicios básicos que necesitaría una comunidad para elevar su calidad de vida de forma considerable (viviendas, hospitales, escuelas y negocios). Los autores encontraron que este tipo de sistema presenta alta viabilidad de implementación gracias al gran recurso que posee el país.

Por otro lado, existen ciertas tendencias en el mercado en los cuales se busca implementar sistemas híbridos lo más autosuficientes posibles, extendiendo la matriz de fuentes renovables a tecnologías y fuentes emergentes como la biomasa, las celdas de combustible y el almacenamiento en hidrógeno por medio de un electrolizador, debido al gran potencial de generación que poseen. Suresh *et al.* (2020) analizan la implementación de sistemas híbridos en Karnataka, India, considerando el consumo de 408 viviendas (1 686 personas), a fin de optimizar el dimensionamiento que minimice el costo de la energía. Se encontró que un sistema compuesto por biogás y biomasa, de carácter solar y eólico, con celdas de combustible y almacenamiento en baterías, brinda el menor costo de energía (0.163 US\$/kWh) con un porcentaje nulo de insatisfacción de la demanda.

Por su parte, Samy *et al.* (2020) analizan la viabilidad de un sistema solar-eólico con almacenamiento en celdas de combustible para electrificación rural en zonas de Egipto. Estudian diferentes combinaciones de tecnologías dimensionadas mediante optimización metaheurística y encuentran que el sistema es económicamente viable debido a que se encuentra un costo de la energía menor al de la red (0.47 \$/kWh).

Panorama en México

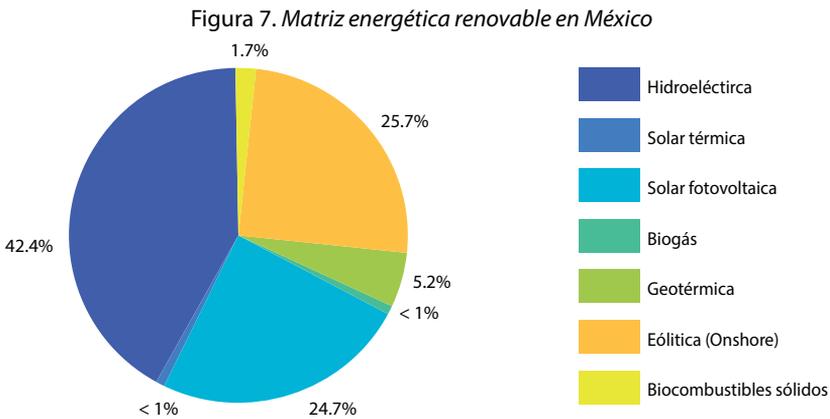
Resulta natural pensar en si México posee capacidad de recurso para implementar sistemas híbridos como los mencionados en la tercera sección

como solución al déficit de electrificación. En realidad, el país es altamente privilegiado en cuanto a recursos renovables se refiere.

En particular, se sabe que el país se encuentra dentro del cinturón solar global (países cuya latitud es $\pm 35^\circ$ con respecto al ecuador), en el cual la radiación global recibida es la óptima para desarrollar su potencial fotovoltaico. En México, la radiación global anual promedio es mayor a los 6 kWh/m²-día, principalmente en las regiones norte, noroeste, centro y occidente.

Por otro lado, el recurso eólico en el país presenta potencial para ser explotado, ya que se sabe que existen velocidades de viento promedio desde 1 hasta 4.7 m/s. Principalmente, en Estados del noroeste y sureste, las velocidades del viento superan los 4 m/s, lo que implica entre 1 700 y 2 350 horas utilizables al año (Peña *et al.*, 2020).

En cuanto a otros recursos renovables disponibles en México, se cuenta con grandes fuentes hídricas para generación hidroeléctrica, fuentes geotérmicas, así como biocombustibles sólidos y biogás, los cuales han sido fundamentales en la matriz energética nacional en los últimos años (figura 7).



Fuente: IRENA (2021).

Conclusión

La pobreza energética representa un problema de importancia mundial en la actualidad, la cual debe ser abordada desde un panorama amplio que considere todas las perspectivas y aristas necesarias para lograr una mejora importante en la calidad de vida de las personas. Esto implica el desarrollo de nuevas políticas públicas y programas sociales que fomenten su mitigación de la mejor manera, atendiendo al mismo tiempo las problemáticas energéticas, como el cambio climático y el calentamiento global. Los sistemas renovables híbridos resultan una opción viable para la erradicación del déficit de electrificación tanto desde el punto de vista social y sustentable como del económico; además, en México se cuenta con un recurso energético envidiable en el mundo, lo cual hace mucho más materializable este tipo de *proyectos en zonas rurales*. Es natural pensar que la implementación de este tipo de sistemas en zonas rurales conlleva gran inversión tecnológica (optimización, predicción y control) y de capital humano capacitado para ayudar a obtener la mejor combinación financieramente viable. Sin embargo, el balance costo-beneficio de la solución es infinitamente positivo, ya que hablamos de brindar un bienestar y una mejora en la calidad de vida a millones de personas, asegurando un futuro sustentable para las generaciones posteriores.

Bibliografía

- Banco Mundial. (2020). Acceso a la electricidad (% de población) [conjunto de datos] <https://datos.bancomundial.org/indicador/EG.ELC.ACCTS.ZS?locations=XL>.
- Energy Sector Management Assistance Program. (2020). *The State of Access to Modern Energy Cooking Services*, The World Bank.
- Fosso, G., et al. (2023). Techno-economic investigation of an environmentally friendly small-scale solar tracker-based PV/wind/Battery hybrid system for off-grid rural electrification in the mount Bamboutos, Cameroon. *Energy Strategy Reviews*, 48, 101107.
- Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC). (2021). *Electrificación rural para comunidades fuera de la red utilizando generación de energía renovable con sistemas híbridos*, Gobierno de México.

- Suresh, V., *et al.* (2020). Modelling and optimization of an off-grid hybrid renewable energy system for electrification in a rural area. *Energy Reports*, 6, 594-604.
- Samikannu, R., *et al.* (2022). An Assessment and Design of a Distributed Hybrid Energy System for Rural Electrification: The Case for Jamataka Village, Botswana. *International Transactions of Electrical Energy Systems*.
- Wesley, J., *et al.* (2020). Techno-economic analysis of a PV-wind-battery for a remote community in Haiti. *Case Studies in Chemical and Environmental Engineering*, 2, 100044.
- Ronay, K., *et al.* (2017). Micro-grid development using artificial neural network for renewable energy forecast and system control. *Procedia Engineering*, 181, 818-823.
- Mustafa, S., *et al.* (2022). Electricity demand forecasting with use of artificial intelligence: The case of Gokceada Island. *Energies*.
- Samy, M. M., *et al.* (2020). Techno-economic analysis for rustic electrification in Egypt using multi-source renewable energy based on PV/wind/FC. *International Journal of Hydrogen Energy*, 45, 11471-11483.
- Silvera, O., *et al.* (2021). Wind and solar resource assessment and prediction using artificial neural network and semi-empirical model: case of study of the Colombian Caribbean region, Heliyon, 7.
- Peña, R., *et al.* (2020). Economic and Energy Analysis of Small Capacity Grid-connected Hybrid Photovoltaic-wind Systems in Mexico, *International Journal of Energy Economics and Policy*.
- Department of the Environment Climate and Communications. (2022). Energy Poverty Action Plan, Gobierno de Irlanda.
- Antepara, I. (2022). Pobreza energética en tiempos de precios altos de la energía, Cuadernos de trabajo Hegoa.
- Natividad, L., y Benalcazar, P. (2023). Hybrid Renewable Energy Systems for Sustainable Rural Development: Perspectives and Challenges in Energy Systems Modeling, *Energies*.
- Comisión Nacional del Agua. (2022). Reporte Anual del Clima en México, Gobierno de México.
- Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático. (2021). Electrificación rural para comunidades fuera de la red utilizando generación de energía renovable con sistemas híbridos, Gobierno de México.
- Comisión Federal de Electricidad. (2021). Informe Anual, Gobierno de México.
- European Commission. (2016). Selecting Indicators to Measure Energy Poverty, DG Energy.
- Energy Sector Management Assistance Program. (2020). The State of Access to Modern Energy Cooking Services, The World Bank.
- Comisión Nacional para el Uso Eficiente de la Energía. (2022). Servicios energéticos, pobreza energética y eficiencia energética: Una perspectiva desde México, Gobierno de México.
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía. (2018). Encuesta Nacional sobre Consumo de Energéticos en Viviendas Particulares, INEGI.

- International Energy Agency. (2021). Recommendations of the Global Commission on People-Centred Clean Energy Transitions, IEA, <https://www.iea.org/reports/recommendations-of-the-global-commission-on-people-centred-clean-energy-transitions>.
- International Renewable Energy Agency. (2021). Country Rankings, <https://www.irena.org/Data/View-data-by-topic/Capacity-and-Generation/Country-Rankings>.
- Agajie, T., *et al.* (2023). A Comprehensive Review on Techno-Economic Analysis and Optimal Sizing of Hybrid Renewable Energy Sources with Energy Storage Systems, Energies.
- Al-Ghussain, L., y Taylan, O. (2021). Comparison of objective functions on the sizing of hybrid PV and wind energy systems with and without energy storage systems, Hybrid Energy System Models, Elsevier.

XI. La recuperación de recursos en las aguas residuales como pilar en la circularidad hídrica y motor de paz positiva

LUZ MARCELA FERNÁNDEZ BRISEÑO*

EDUARDO PARRA RAMOS**

DOI: <https://doi.org/10.52501/cc.178.11>

Resumen

La gestión integral del agua bajo un enfoque de cuenca, y en concordancia con los principios de la economía circular, precisa una visión que reduzca el consumo de recursos e incremente su recuperación. Bajo esta óptica, el tratamiento de aguas presenta la oportunidad de recuperar energía y nutrientes, así como de contar con alternativas para su aprovechamiento en beneficio de otras fuentes de abastecimiento. Las aguas residuales pueden tratarse hasta lograr diversas calidades para satisfacer la demanda de sectores como la industria y la agricultura, para mantener el flujo ambiental y, de igual modo, reutilizarse como agua potable para poblaciones vulnerables. El reúso del agua residual es una solución al problema de la escasez de agua, puesto que se liberan recursos de ésta para otros usos o para su conservación. Además, los productos secundarios del tratamiento de las aguas residuales pueden convertirse en insumos para la agricultura y la generación de energía, lo cual hacía que las plantas de tratamiento de aguas sean más sostenibles. La recuperación de recursos de las aguas residuales representa beneficios económicos y sociales que contribuyen a la sostenibilidad de los sistemas de saneamiento, así como una solución al problema de escasez de agua que sufren diversas comunidades en nuestro país, sobre todo aquellas

* Candidata a Doctora en Derechos Humanos. Escuela de Ciencias Sociales y Gobierno, Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Monterrey, México.

** Maestro en Ciencias e Ingeniería del Agua. Instituto para la Educación del Agua unesco-ihe, Países Bajos.

que de manera histórica han sido despojadas del vital recurso a partir de la concesión de aguas nacionales a grandes empresas, situación en la que no se les toma en consideración a pesar de que, por mandato constitucional, el principal uso del agua en México debe ser para consumo personal y doméstico.

Palabras clave: *Derecho humano al agua, paz positiva, aguas residuales, gestión hídrica, economía circular.*

Introducción

El acceso al agua es afectado por el efecto conjunto que ejercen los diversos usuarios de una cuenca, de modo que la demanda sectorial no puede ser del todo cubierta, situación que comúnmente es denominada escasez (ONU-Agua, 2012).

La escasez suele ser medida en función de la relación entre los recursos hídricos y la población, por lo que puede tomar un valor en una región (por ejemplo, 1.7 m³ por persona) y otro diferente en una zona distinta (por ejemplo, 1 m³ por persona). Se considera que la escasez puede ser física —una limitante de los recursos hídricos para atender la demanda— o económica, que está ligada a aspectos de la gestión de los recursos para poder llevar el agua a los usuarios (ONU-Agua, 2012).

En el último siglo, el consumo de agua se ha multiplicado por seis (Véase Riechmann, 2018). En tanto, la Organización de Naciones Unidas (2018) enlista los siguientes desafíos del agua a nivel mundial (Universidad Nacional Autónoma de México y Comisión Nacional de Derechos Humanos, 2018):

- 2.1 billones de personas carecen de acceso a servicios de agua potable gestionados de manera segura (OMS y Unicef, 2017).
- 4.5 billones de personas carecen de servicios de saneamiento gestionados de forma segura (OMS y Unicef, 2017).
- 340 000 niños menores de cinco años mueren cada año por enfermedades diarreicas (OMS y Unicef, 2017).
- La escasez de agua afecta a 4 de cada 10 personas (OMS).

- 90% de los desastres naturales están relacionados con el agua (Oficina de las Naciones Unidas para la Reducción del Riesgo de Desastres).
- 80% de las aguas residuales retornan al ecosistema sin ser tratadas o reutilizadas (Unesco, 2017).
- Alrededor de dos tercios de los ríos transfronterizos del mundo no tienen un marco de gestión cooperativa (Instituto Internacional del Agua de Estocolmo).
- La agricultura representa 70% de la extracción mundial de agua (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura).
- Aproximadamente 75% de las extracciones de agua industrial se utilizan para la producción de energía (Unesco, 2014).

En México, según los datos más recientes presentados por la Comisión Nacional del Agua (Conagua), sólo 58% de la población tiene agua diariamente en su domicilio y cuenta con saneamiento básico mejorado. La Conagua ha informado que, en el contexto urbano, la cobertura de servicios de agua y saneamiento llega aproximadamente a 64% de la población, mientras que en las zonas rurales sólo llega a 39%¹ (Centro de Estudios Constitucionales de la SCJN, 2021).

De acuerdo con el *Estudio sobre protección de ríos, lagos y acuíferos desde la perspectiva de los derechos humanos* (Universidad Nacional Autónoma de México y Comisión Nacional de Derechos Humanos, 2018), en México:

- 9.08 millones de habitantes no tienen acceso a agua segura para su salud.
- 1.5 millones de indígenas no tienen servicio de agua entubada en la vivienda y 3.2 millones carecen de drenaje.
- Sólo se sana 35.36% de aguas residuales.
- Cada segundo se vierten a las redes de descarga y cuerpos de agua 89.2 m³/s de aguas contaminadas sin tratamiento alguno.

¹ Conagua (2020).

- Se vierten 138.74 m³/s de aguas residuales de origen industrial a cuerpos de aguas.
- 54% de las aguas negras se descargan en ríos o arroyos.
- Más de 70% de los ríos, lagos y presas presenta algún grado de contaminación.
- Existen 144 acuíferos sobreexplotados.

En tanto, la disponibilidad de agua per cápita se reduce de manera drástica al pasar de 18 035 m³/hab/año en el año 1950 a 7 771 m³/hab/año cincuenta años después, y la cifra en el 2015 se estableció en 3 338 m³ /hab/año (Semarnat, 2008a; Conagua, 2011 y 2015).

En México, la cobertura de agua potable a partir de los años censales muestra un aumento en la población con posibilidades de tener acceso al agua: en 1990 78.39% de la población tenía acceso al agua potable, luego aumentó a 87.83 y 90.94% en los años censales 2000 y 2010 respectivamente (Conagua, 2015). Los datos más recientes señalan que 95.3% de la población en el país tiene acceso al servicio de agua entubada (Semarnat y Conagua, 2016).

Sin embargo, el acceso al agua aún es un problema para las personas de las áreas rurales, las que habitan en lugares de difícil acceso y en las áreas conurbadas de poco interés para los políticos y la inversión económica. En el territorio mexicano 87% de la población rural, que vive en localidades con menos de 2 500 habitantes, tiene acceso al agua entubada y para el saneamiento la cifra es de 77.5% (Semarnat y Conagua, 2016). Estas localidades están relacionadas con asentamientos de población indígena, campesina y afrodescendiente con grados de marginación altos y vulnerabilidad, las cuales tienen dificultades para obtener agua en forma suficiente y almacenarla para las necesidades básicas familiares (Universidad Nacional Autónoma de México y Comisión Nacional de Derechos Humanos, 2018).

La situación de estas poblaciones vulnerables se evidencia más precaria y con riesgos de sufrir enfermedades relacionadas con el agua no apta para consumo humano. Estas condiciones llaman a diseñar fórmulas desde el Estado con participación social y bajo marcos de equidad y justicia social para plantear un escenario diferente a la población, que en el 2030 se espera que sea de 137.5 millones de habitantes y en el 2050 alcanzará la cifra de

150.8 millones de habitantes en el país, de acuerdo con el Consejo Nacional de Población (Conapo).

Según lo anterior, en México existirían problemas de escasez de agua no sólo por temas de distribución fisiográfica y climática, sino también por índole económica, como la contaminación de fuentes de agua superficiales y subterráneas, el subsecuente tratamiento y el incremento acelerado de las demandas por los diversos usuarios de la cuenca. Ante este escenario se presenta el reúso del agua como una medida de gestión circular que representa una solución parcial al problema de escasez. Más de 70% de los cuerpos de agua del país presentan algún grado de contaminación, lo que ocasiona graves problemas de disponibilidad del agua, la cual ha pasado en menos de 60 años, de 19 365 a 3 982 m³ por habitante al año, debido al incremento de la demanda del agua en zonas con menor disponibilidad de recursos, principalmente en el norte y centro del país (Conagua, 2016) (Hernández-Salazar, Moreno-Seceña y Sandoval-Herazo, 2017)

El tratamiento de las aguas residuales municipales en México alcanzó 52.72% en el año 2015, valor que se localiza por debajo de la cobertura del servicio en otros países de Latinoamérica, como Argentina y Chile, que superan 80% de saneamiento (De Anda Sánchez, 2017). El caudal tratado al 2021 con estas plantas de tratamiento corresponde a 145.34 m³/s (Conagua, 2022). La reutilización de las aguas residuales representa una alternativa sustentable no sólo de incremento en la cobertura de saneamiento de aguas residuales, sino también de abastecimiento en diversas comunidades del país.

En tanto, el sector industrial genera un caudal de 214.6 m³/s de agua residual, del cual sólo se trata 70.5 m³/s (Conagua, 2016), lo cual deja sin ningún tipo de tratamiento 67.06% de las aguas industriales de empresas formalmente constituidas que reportan datos, normalmente las grandes y medianas empresas, mientras que las pequeñas y microempresas, que constituyen 98.7% de la actividad industrial en el país, no tratan las aguas residuales que producen, y mucho menos las industrias no formales que se desarrollan en comunidades rurales alejadas (Hernández-Salazar, Moreno-Seceña y Sandoval-Herazo, 2017).

En México, el uso agrupado de la industria autoabastecida representa únicamente 4.4% del uso consuntivo total, pero denota un crecimiento im-

portante a la alza en años recientes (Conagua, 2018), para lo cual, ante el surgimiento de conflictos como el de la planta cervecera en Mexicali, B. C. (Forbes, 2019), el debate público sobre las políticas en la materia ha planteado el incremento de la regulación sobre la industria, ajuste de tarifas y eliminación de subsidios y una vigilancia más estricta del cumplimiento de la normatividad. Como puede observarse, el sector industrial compite por el uso del agua con otros sectores productivos, particularmente con el agrícola, y en algunas regiones esto se convierte en un factor de conflicto social y político (Hernández-Salazar, Moreno-Seceña y Sandoval-Herazo, 2017).

Derecho humano al agua

El 29 de septiembre de 2016, la Asamblea General de Naciones Unidas emitió la resolución aprobada por el Consejo de Derechos Humanos, mediante la cual se reconoce que los derechos humanos al agua potable y el saneamiento son componentes del derecho a un nivel de vida adecuado y son esenciales para el pleno disfrute del derecho a la vida y de todos los derechos humanos. Además, señala que, en virtud del derecho humano al agua potable, toda persona, sin discriminación, tiene derecho a agua suficiente, salubre, aceptable, físicamente accesible y asequible para uso personal y doméstico y que, en virtud del derecho humano al saneamiento, toda persona, sin discriminación, tiene derecho al acceso, desde el punto de vista físico y económico, en todas las esferas de la vida, a un saneamiento que sea salubre, higiénico, seguro, social y culturalmente aceptable y que proporcione intimidad y garantice la dignidad, al tiempo que reafirma que ambos derechos son componentes del derecho a un nivel de vida adecuado. Asimismo, la asamblea general afirma que los derechos humanos al agua potable y el saneamiento están estrechamente relacionados entre sí, pero tienen características que justifican un trato distinto a fin de abordar problemas específicos en su aplicación (Asamblea General de los Derechos Humanos, 2016).

Por su parte, el Comité de Derechos Económicos, Sociales y Culturales (Comité DESC), órgano supervisor del Pacto Internacional de Derechos Económicos, Sociales y Culturales, en su observación general número 15, ex-

plicó por qué la realización del derecho al agua es una condición necesaria para que puedan concretarse otros derechos fundamentales, como el de llevar una vida digna, incluyendo el acceso a una alimentación nutritiva y una vivienda adecuada, así como para mejorar cada vez más las condiciones de existencia y tener acceso a los niveles más altos posibles de salud física y mental (Centro de Estudios Constitucionales de la SCJN, 2021).

El Comité DESC identificó tres factores mínimos que deben cumplirse para que éste derecho humano sea viable en la práctica. Primero, la disponibilidad de agua suficiente y continua para cada uso personal y doméstico. Segundo, la calidad del agua deberá ser apta para consumo humano y su aplicación en usos domésticos, sin poner en riesgo la salud. Tercero, la accesibilidad al agua, tanto física como económica. Deben darse estos factores en un contexto de igualdad y no discriminación, así como de acceso oportuno a la información (Centro de Estudios Constitucionales de la SCJN, 2021). En este último requisito cobra especial importancia el Acuerdo Regional sobre el Acceso a la Información, la Participación Pública y el Acceso a la Justicia en Asuntos Ambientales en América Latina y el Caribe (Acuerdo de Escazú), del que México es parte desde 2021.

A su vez, el país está comprometido con el cumplimiento de la Agenda 2030, que cuenta con 17 objetivos de desarrollo sostenible (ODS) que pueden agruparse en tres categorías, entre las que se encuentra la de *desarrollo humano*, que incluye la lucha contra la pobreza, la erradicación del hambre, el acceso a servicios básicos (salud, educación, agua y saneamiento) e igualdad de género (ODS 1 a 6) (Anglés-Hernández, 2021).

En cuanto al tema hídrico y su relación con el cambio climático, el Estado mexicano debería tomar en cuenta lo siguiente en cuanto a los siguientes ODS: “3. Garantizar una vida sana y promover el bienestar”, pues el cambio climático afecta los determinantes de la salud humana (aire limpio, agua potable, saneamiento adecuado y alimentos) (Whitmee *et al.*, 1978); “6. Garantizar la disponibilidad y la gestión sostenible del agua y el saneamiento”, ya que el cambio climático altera los flujos fluviales y la calidad del agua y, por ende, los suministros de agua dulce, mientras que las instalaciones de saneamiento sobre el terreno y las plantas de tratamiento de aguas residuales emiten metano y otros contaminantes. Además, se estima que, por cada grado de calentamiento global, aproximadamente 7% de la población mun-

dial estará expuesta a una disminución de los recursos hídricos renovables de al menos 20% (ONU-Agua, 2020) (Anglés-Hernández, 2021).

En México el derecho humano al agua, reconocido en el artículo 4º, párrafo sexto, de la Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos (CPEUM), implica que todas las personas, en condiciones de igualdad y no discriminación, puedan contar con agua suficiente, segura y asequible para usos personales y domésticos, incluyendo el consumo para bebidas y alimentos, la higiene personal y doméstica y la preparación de alimentos en el hogar (Centro de Estudios Constitucionales de la SCJN, 2021).

Al respecto, la Suprema Corte de Justicia de la Nación (SCJN) ha interpretado el contenido y alcance del derecho humano al agua a partir de lo establecido por el Comité DESC, pero también se ha enfocado en gran medida en la interpretación pragmática del artículo 4º constitucional, en el cual se establece claramente que corresponde al Estado garantizar el derecho humano al agua, logrando al mismo tiempo el uso equitativo y sustentable de los recursos hídricos, con la participación de las autoridades en los tres órdenes de gobierno y la ciudadanía (Centro de Estudios Constitucionales de la SCJN, 2021).

Además, la SCJN reconoce la vinculación intrínseca del derecho humano al agua con el mandato constitucional para lograr un desarrollo nacional sustentable, en el cual está implícita la equidad intergeneracional para garantizar que las generaciones futuras tengan acceso a agua segura y suficiente (Centro de Estudios Constitucionales de la SCJN, 2021). Sin embargo, la realidad es que en México las brechas en el acceso y la disponibilidad de agua para consumo humano entre los Estados y entre la población rural y urbana contrastan significativamente, aunado a que el acceso de agua a las industrias parece ilimitado (Universidad Nacional Autónoma de México y Comisión Nacional de Derechos Humanos, 2018).

En este sentido, el mandato constitucional del derecho humano al agua debería ser interpretado por el Estado mexicano bajo el principio de “defensa del derecho de las comunidades a establecer sus propios sistemas de producción, incluyendo las políticas de agricultura, pesca, alimentación, bosques y territorio que sean apropiadas para sus circunstancias desde un punto de vista ecológico, social, económico y cultural. Además de respetar y garantizar el acceso de las personas, especialmente de las mujeres, al con-

trol de los recursos productivos tales como la tierra, las semillas y el agua” (Klimaforum, 2009).

Propuestas técnicas de circularidad

El tratamiento y posterior reúso de las aguas residuales puede no sólo mitigar los efectos de la escasez de agua, sino también brindar una alternativa costoeficiente para la recuperación de energía y nutrientes.

El cambio de paradigma que ha llevado al reconocimiento del agua residual como recurso ha impulsado diversas aplicaciones, como el empleo de aguas tratadas para refrigeración en unidades térmicas, el riego de áreas verdes, la recuperación de nutrientes contenidos en los lodos para usos agrícolas y la recuperación de energía por medio del biogás (Banco Mundial, 2020).

En dicho sentido, la recuperación de nutrientes de las aguas residuales contribuye a la recuperación de recursos limitados, como es el caso del fósforo: al tratarse de un elemento no renovable ni sintetizable artificialmente, la reducción en su disponibilidad constituye una amenaza para la producción de alimentos a nivel mundial (Diaz-Elsayed *et al.*, 2019).

Dicha recuperación de elementos puede tenerse mediante la gestión circular de las aguas residuales, la cual se relaciona con el ODS no. 6 (agua limpia y saneamiento), que incluye las siguientes metas específicas (PNUD, 2019):

- A 2030, mejorar la calidad del agua reduciendo la contaminación, eliminando el vertimiento y minimizando la emisión de productos químicos y materiales peligrosos, al grado de reducir a la mitad el porcentaje de aguas residuales sin tratar y aumentar considerablemente el reciclado y la reutilización sin riesgos a nivel mundial.
- A 2030, aumentar considerablemente el uso eficiente de los recursos hídricos en todos los sectores y asegurar la sostenibilidad de la extracción y el abastecimiento de agua dulce para hacer frente a la escasez de agua y reducir considerablemente el número de personas que sufren falta de agua.

Lo anterior que permitirá alimentar el indicador circular de agua (WCI, por sus siglas en inglés), herramienta para el monitoreo y evaluación de los fines de la gestión circular del agua (Kakwani y Kalbar 2022).

En México existen ya algunas prácticas de reúso de tratamiento de aguas residuales y se han hecho identificaciones de potencial por cada uno de los principales usos. Uno de los sectores que principalmente se podría beneficiar de esta visión circular es la industria, con aplicaciones como agua para enfriamiento, agua para calderas, etcétera. En la agricultura, para atender los grandes volúmenes requeridos, las aguas residuales se presentan como una alternativa, así como el aprovechamiento de lodos como fuente de nutrientes. Existe también un potencial de empleo de aguas tratadas en fraccionamientos que dentro de sus instalaciones consideran grandes áreas verdes y campos de golf o lagos recreativos. Por último, a nivel municipal, el uso público podría comprender el riego de camellones, parques y lagos (Escalante *et al.*, s. f.)

Por ejemplo, en el Valle de México, la planta de tratamiento de aguas residuales (PTAR) de Atotonilco de Tula ha contribuido a impulsar la productividad del distrito de riego de cerca de 90 000 hectáreas. Fue diseñada para operar dos procesos: (a) un tren físico-químico basado principalmente en tratamiento primario para devolver agua al río con la calidad establecida en la NOM-001-Semarnat-1996; (b) un sistema de tratamiento biológico para que el flujo de las aguas tratadas pueda ser reusado en la irrigación. Este esquema de tratamiento optimiza los recursos de la planta y reduce los costos de su operación. En el proceso de estabilización de lodos, el biogás es generado y se produce electricidad para autoconsumo de la planta (Banco Mundial, 2018).

Los beneficios de la circularidad hídrica deben ser también gestionados bajo un enfoque de cuenca multisectorial. En el caso de la planta de tratamiento de Atotonilco, una de las principales lecciones aprendidas tiene que ver con el involucramiento de actores clave (en este ejemplo, el uso agrícola del agua) desde las etapas tempranas de planeación hasta la gestión del agua tratada como recurso (Banco Mundial, 2018).

Los agricultores del Valle de México aún no están del todo convencidos de los beneficios de las aguas residuales tratadas de la PTAR de Atotonilco, y perciben un riesgo en el establecimiento de tarifas por la utilización de

éstas sobre sus cultivos. Como parte de la atención a estos desafíos, se ha creado el Fideicomiso Infraestructura Ambiental de los Valles de Hidalgo para facilitar los procesos de toma de decisiones y habilitar las propuestas para mejorar la gestión hídrica en la cuenca (Banco Mundial, 2018).

Mejorar la sostenibilidad, calidad y resiliencia de los servicios de saneamiento es esencial para asegurar que las personas puedan contar con los beneficios derivados del tratamiento de aguas residuales (Banco Mundial, 2020).

Paz positiva aplicada a los conflictos socio hídricos

La *paz positiva* se define como las actitudes, instituciones y estructuras que crean y sostienen sociedades pacíficas. Los niveles más altos de paz positiva están estadísticamente vinculados con un mayor crecimiento de los ingresos, mejores resultados ambientales, niveles más altos de bienestar, mejores resultados de desarrollo y una mayor resiliencia (Instituto para la Economía y la Paz, 2022).

La paz positiva se basa en ocho pilares que describen el funcionamiento del sistema socioeconómico (Instituto para la Economía y la Paz, 2022) y de los cuales, para los propósitos del presente capítulo, algunos se enfocarán en lo que atañe al derecho humano al agua y a la gestión hídrica:

- *Buen funcionamiento del Gobierno.* Un Gobierno que proporciona servicios públicos de alta calidad y que genera confianza y participación.
- *Entorno empresarial sólido.* Fortaleza de las condiciones económicas.
- *Distribución equitativa de los recursos.* Los países pacíficos tienden a garantizar la equidad en el acceso a recursos.
- *Aceptación de los derechos de los demás.* Los países pacíficos tienen leyes formales que garantizan los derechos humanos y las libertades básicas, y las normas sociales y culturales informales que se relacionan con el comportamiento de los ciudadanos.
- *Buenas relaciones con los vecinos.* Los países con relaciones externas positivas tienden a ser más estables políticamente; tienen Gobiernos

que están integrados regionalmente y niveles más bajos de conflicto interno organizado.

- *Libre flujo de información.* Conduce a un mayor conocimiento y ayuda a las personas, las empresas y la sociedad civil a tomar mejores decisiones.
- *Altos niveles de capital humano.* Medida en la que las sociedades educan a los ciudadanos y promueven el desarrollo del conocimiento.
- *Bajos niveles de corrupción.* En las sociedades con altos niveles de corrupción, los recursos se asignan de manera ineficiente, lo que a menudo conduce a una falta de fondos para servicios esenciales, así como disturbios civiles.

Los altos niveles de paz positiva ocurren cuando las actitudes hacen que la violencia sea menos tolerada, las instituciones resilientes y más receptivas a las necesidades de la sociedad y las estructuras creen un ambiente para la resolución no violenta de las quejas. La paz positiva también se puede estudiar en sus tres dominios (Instituto para la Economía y la Paz, 2022):

- *Actitudes:* describe cómo los miembros de una sociedad se ven y relacionan entre sí.
- *Instituciones:* mide la eficacia, la transparencia y la inclusión de las organizaciones administrativas.
- *Estructuras:* mide las bases tecnológicas, científicas y económicas que sustentan el desarrollo social.

En esta tesitura, y toda vez que el derecho humano al agua —como ya lo vimos con antelación— se encuentra ligado a la equidad intergeneracional, para los efectos de las propuestas de circularidad hídrica como motor de la paz positiva, nos enfocaremos en los pilares de *distribución equitativa de los recursos* y de la *aceptación de los derechos de los demás* como soporte para nuestras recomendaciones.

Para ello, cabe señalar que el artículo 25 de la CPEUM establece que corresponde al Estado la rectoría del desarrollo nacional para garantizar que éste sea integral y sustentable, que fortalezca la soberanía de la nación y su régimen democrático y que, mediante la competitividad, el fomento del crecimiento económico y el empleo, así como una más justa distribución

del ingreso y la riqueza, permita el pleno ejercicio de la libertad y la dignidad de los individuos, grupos y clases sociales (Acuña, Carmona y Peralta, 2017).

Este artículo constitucional aborda el pilar de la paz positiva *distribución equitativa de recursos* en cuanto al concepto de desarrollo sustentable que, de acuerdo con el Informe “Nuestro Futuro Común” de 1987 —mejor conocido como el Informe de Brundtland—, es “la satisfacción de las necesidades de la generación presente sin comprometer la capacidad de las generaciones futuras para satisfacer sus propias necesidades”, y que, como ya lo vimos anteriormente, la SCJN ha invocado jurisprudencialmente bajo el concepto de equidad intergeneracional para garantizar que las generaciones futuras tengan acceso a agua segura y suficiente.

Además, el concepto de desarrollo sustentable o sostenible, mismo que a su vez es considerado uno de los principios de derecho internacional ambiental —conforme a la Declaración de la Cumbre de la Tierra de Río de Janeiro de 1992—, establece claramente que el desarrollo económico debe considerar no sólo la satisfacción de las personas que actualmente nos encontramos disfrutando de los recursos naturales de nuestro planeta, sino también la satisfacción de estos mismos recursos por parte de las generaciones venideras.

Sin embargo, no sólo deberíamos ocuparnos de proteger los recursos de las generaciones futuras, sino que los Estados y los ciudadanos (de manera corresponsable) deben garantizar la aceptación del derecho de los demás (otro de los pilares de la paz positiva); esto en razón de las grandes desigualdades que de manera histórica se siguen permitiendo entre los países o sectores desarrollados y los países en desarrollo y en las comunidades más vulnerables.

Hablar de pobreza implica no sólo hacer referencia a ingresos bajos o nulos, sino también a la carencia de bienes y servicios indispensables para vivir dignamente (agua potable, vivienda, salud, educación, vestido, energía, entre otros); esto conlleva la garantía de múltiples derechos humanos (Anglés-Hernández, 2016). Además, la falta de instalaciones de saneamiento conlleva la contaminación del suelo y de las fuentes de abastecimiento de agua (Anglés-Hernández, 2021). En este sentido, por ejemplo, la carta africana de justicia climática afirma: “El sistema de alimentación industrial

actual produce hambre, usa el agua de manera ineficiente, destruye la naturaleza, libera carbono y, por lo general, no es saludable” (CJCM).

Estas situaciones son las que producen los denominados conflictos socioambientales, que generalmente tienen un fuerte eje en los problemas del agua, como contaminación, sobreexplotación y privilegios a ciertos actores, lo cual invalida los derechos de agua de actores tradicionales, como indígenas, comunidades afrodescendientes, habitantes de barrios populares conurbados, de localidades rurales aisladas y agricultores tradicionales, para los cuales el Estado tendría que atender estos conflictos por afectación a cada grupo vulnerable mediante la búsqueda del interés colectivo y los pueblos asentados históricamente en territorios pronunciados de utilidad para el capital privado o estatal (que son los que generalmente se ven más afectados).

Lo anterior debido a que las percepciones sociales apuntan a una amplia desconfianza por parte de la sociedad civil organizada y no organizada para participar en actividades convocadas por el Gobierno en el sector, trátase del Federal, del Consejo de Cuenca (en el caso de México) y otras instancias formales de gestión del agua; esto aundado a lo antes señalado, por la simulación y el enmascaramiento que ha sido fomentado y permitido por el sector gubernamental (Universidad Nacional Autónoma de México y Comisión Nacional de Derechos Humanos, 2018).

A partir de estas injusticias que generan conflictos socioambientales existe un trabajo intenso que muchas defensoras de la tierra y de las comunidades realizan en países del sur global contra el cambio climático, contra el saqueo de la tierra y del agua. Se trata de luchas en las que muchas de ellas son criminalizadas, violentadas y, en el extremo, como fue el caso de Berta Cáceres o de Marielle Franco, asesinadas. No obstante, ellas resisten, construyen las alternativas y mantienen en pie comunidades y bosques (Herrero López, 2021). Para ello el Estado está obligado a favorecer procesos de diálogo para el diseño e implementación de acciones colectivas entre los gobiernos locales, las organizaciones civiles, las empresas que se benefician de los territorios sujetos a explotación y las comunidades (Universidad Nacional Autónoma de México y Comisión Nacional de Derechos Humanos, 2018).

Para ello se requiere:

- Creación de espacios y canales de interacción entre los actores y en distintas escalas, que tengan poder de decisión y recursos económicos para sostener relaciones en el largo plazo, más allá de los planes sexenales.
- Capacitación a grupo de funcionarios y funcionarias públicas para establecer diálogos con equidad y acciones coparticipativas y de corresponsabilidad.
- Diseño de estrategias de educación ambiental y formación de recursos humanos que integren la transversalidad de la problemática del agua en las cuencas, territorios y regiones.
- Diálogo transdisciplinario para tratar los problemas de contaminación, sobreexplotación de cuerpos de agua, resolución de conflictos y de gestión medioambiental.
- Mecanismos interinstitucionales de corresponsabilidad entre los actores públicos, privados y comunitarios, y sus múltiples relaciones con la comunidad académica.

A su vez, las instituciones formales y no formales, presentes en las escalas macro, meso y micro, que engloban la gestión del agua en una región o país, tendrían que establecer criterios de equidad en la participación de todos los actores involucrados, así como en las responsabilidades y la claridad en el sistema de sanciones y remediación. En este sentido, las políticas de gestión y las acciones derivadas, por ejemplo, de remediación constituyen procesos que van más allá de las misiones políticas municipales, estatales y nacionales y que también incluyen a los actores sociales, económicos, comunitarios y estatales (Universidad Nacional Autónoma de México y Comisión Nacional de Derechos Humanos, 2018).

Para esto los actores estatales y privados, así como las instituciones encargadas de observar el cumplimiento y respeto de los derechos humanos, deben conocer los balances y propuestas que emergen desde la sociedad civil organizada en materia del derecho humano al agua. Una de las demandas de la sociedad es que no hay canales de comunicación ni mecanismos que conlleven a la resolución de conflictos con una dimensión de derechos humanos. También señalan que es muy difícil acceder a la justicia ambiental e hídrica, ya que las instancias gubernamentales son omisas e incluso

actúan fuera de la legalidad. De allí que los tribunales éticos se han convertido en una instancia de justicia alternativa, que hace visible los conflictos y demandas de una sociedad que se siente agraviada por el actuar del Estado para favorecer los intereses de los sectores privados nacionales y transnacionales (Universidad Nacional Autónoma de México y Comisión Nacional de Derechos Humanos, 2018).

Por tanto, los institutos de justicia alternativa, o tribunales éticos, pueden ser los idóneos para buscar solucionar los actuales conflictos sociohídricos con urgencia, sin tener que esperar a largos procedimientos judiciales nacionales e internacionales que, a final de cuentas, no garantizarían una resolución favorable para las comunidades afectadas o, peor aún, que emiten una sentencia que les dé la razón a los afectados sin que ésta tenga carácter restaurativo o sin que se le dé seguimiento en cuanto a su cabal cumplimiento.

Para aspirar a resoluciones de conflictos basadas en la paz positiva, es imprescindible reconocer que la cooperación es una virtud importante para conservar y garantizar bienes comunes como el aire o el agua dulce. Es el hábito de vivir juntos. Su importancia frente al atomismo y la despreocupación por el otro puede ser reforzada mediante rituales colectivos y un fuerte sentido de lo compartido (Velayos Castelo y Romero, 2021).

Conclusión

En México parte de la escasez del agua está supeditada a las presiones de los diversos usuarios que buscan satisfacer sus propios intereses sobre el líquido. Entre estas presiones se cuenta no sólo la extracción, sino la carencia de tratamiento.

Bajo un enfoque de economía circular, el reúso de las aguas tratadas presenta una forma de mitigar los problemas de escasez y la oportunidad de recuperar recursos, como energía y nutrientes. Existen casos de referencia de este tipo de intervenciones en el país, particularmente para el uso agrícola sin embargo, se considera que en el sector industrial existe un potencial importante para migrar a estos esquemas de gestión hídrica.

En adición, la visión oficial del agua por las instituciones gubernamentales es preponderantemente técnico-hidrológica, mientras que lo social es

inexistente o se subordina a lo hidrológico y lo económico, que en los territorios representa una forma más de asimetría en la gestión del agua (Universidad Nacional Autónoma de México y Comisión Nacional de Derechos Humanos, 2018).

Es por ello que, a la luz del Acuerdo de Escazú, aprovechando las cada vez más instituciones de justicia alternativa que se van constituyendo en nuestro país, es imprescindible que el Estado mexicano promueva la resolución de los conflictos sociohídricos que han sido resultado de las desigualdades estructurales que se han permitido de manera histórica y que han afectado en mayor proporción a las comunidades más vulnerables. En este sentido es también necesario que los ciudadanos mexicanos estemos conscientes de que no sólo tenemos el derecho de que el Estado nos garantice el derecho humano al agua para nuestra salud, uso y disfrute, sino que también tenemos la obligación de cumplir con la normatividad aplicable y de coadyuvar con las autoridades competentes en la toma de decisiones y en la defensa del medio ambiente de nuestras comunidades, a partir de los derechos que esa misma comunidad y los ordenamientos relativos nos confieren.

Bibliografía

- Acuña, A., Carmona, M., y Peralta, L. (2017). El marco jurídico normativo climático de México y la normalización de la respuesta institucional al cambio climático: Gobernanza y cumplimiento. En *La Gobernanza Climática en México: Aportes para la consolidación estructural de la participación ciudadana en la política nacional* (vol. 1, pp. 324). Universidad Nacional Autónoma de México.
- Anglés-Hernández, M. (2021). Cambio climático, pobreza y desigualdades: Afectaciones comunes, pero diferenciadas. En S. Borrás-Pentinat y P. Villavicencio-Calzadilla (Eds.), *Justicia climática. Visiones constructivas desde el reconocimiento de la desigualdad* (pp. 183–209). Tirant Lo Blanch.
- . (2016). *Pobreza y exclusión social como factores determinantes para el acceso a la vivienda, al agua potable y al saneamiento*. En *Derechos del Pueblo Mexicano. México a través de sus constituciones; estudios de transversalidad constitucional con perspectiva convencional* (9a ed.). Cámara de Diputados-UNAM, IJ-INE, México, 2016, p. 403.
- Banco Mundial. (2018). Wastewater: from waste to resource. The case of San Luis Potosí, Mexico. Recuperado el 29 de julio de 2022 de: <https://openknowledge.worldbank.org/bitstream/handle/10986/29491/124330-WP-p161389-15-3-2018-15-18-14-WSanLuisPotosi.pdf?sequence=5&isAllowed=y>

- . (2020). Agua residual: de residuo a recurso. Recuperado el 29 de julio de 2022, de: <https://www.bancomundial.org/es/topic/water/publication/wastewater-initiative#infograficos>
- Centro de Estudios Constitucionales. SCJN. (2021). Derecho humano al agua (Primera). Suprema Corte de Justicia de la Nación.
- Climate Justice Charter Movement (South Africa). (s. f.). Climate Justice Charter.
- Comisión Nacional del Agua (2020). Programa Nacional Hídrico 2020-2024. Publicado en el Diario Oficial de la Federación el 30 de diciembre de 2020.
- CONAGUA. (2016). *Estadísticas del agua en México, edición 2016*. Ciudad de México: Semarnat.
- . (2018). *Estadísticas del agua en México, edición 2018*. Ciudad de México: Semarnat.
- . (2022). *Sistema Nacional de Información del Agua*. Recuperado de Reporte Plantas de Tratamiento de Aguas Residual: <https://sinav30.conagua.gob.mx:8080/>
- De Anda Sánchez, J. (2017). Saneamiento descentralizado y reutilización sustentable de las aguas residuales municipales en México. *Sociedad y Ambiente*, 5(14), 119-143.
- Diaz-Elsayed, N., Rezaei, N., Guo, T., Mohebbi, S., y Zhang, Q. (2019). Wastewater-based resource recovery technologies across scale: a review. *Resources, Conservation & Recycling*, 145, 94-112.
- Escalante, V., Cardoso, L., Ramírez, E., Moeller, G., Mantilla, G., Montecillos, J., Villavicencio, F. (s. f.). *El reúso del agua residual tratada en México*. Seminario Internacional sobre Métodos Naturales para el Tratamiento de Aguas Residuales.
- Estadísticas del agua en México. (2016). Ciudad de México: Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, Comisión Nacional del Agua.
- Forbes. (27 de marzo de 2019). *Forbes México*. Obtenido de Constellation Brands defiende planta en Mexicali y pide dialogar: <https://www.forbes.com.mx/constellation-brands-defiende-planta-en-mexicali-y-pide-dialogar/>
- Herrero López, Y. (2021). La crisis ecosocial: Impactos y resistencias en clave de género. En S. Borrás-Pentinat y P. Villavicencio-Calzadilla (Eds.), *Justicia climática. Visiones constructivas desde el reconocimiento de la desigualdad* (pp. 243-265). Tirant Lo Blanch.
- Hernández-Salazar, A. B., Moreno-Seceña, J., y Sandoval-Herazo, L. (2017). Tratamiento de aguas residuales industriales en México: una aproximación a su situación actual y retos por atender. *Revista Internacional de Desarrollo Regional Sustentable*, 2, 75-88.
- Institute for Economics and Peace. (2013). *Pillars of Peace. Understanding the key attitudes and institutions that underpin peaceful societies*. Recuperado el 29 de julio de 2022 de: <https://www.economicsandpeace.org/wp-content/uploads/2015/06/Pillars-of-Peace-Report-IEP2.pdf>
- Instituto para la Economía y la Paz. (2022). Índice de Paz México 2022. Identificación y medición de los factores que impulsan la paz. (p. 102). Instituto para la Economía y la Paz (IEP). Recuperado el 29 de julio de 2022 de: <http://visionofhumanity.org/resources>

- Kakwani, N. S., y Kalbar, P. P. (2022). Measuring urban water circularity: Development and implementation of a Water Circularity Indicator. *Sustainable Production and Consumption*, 31, 723–735. <https://doi.org/10.1016/j.spc.2022.03.029>
- Organización de las Naciones Unidas-Agua. (2020). Informe de políticas de ONU-AGUA sobre el Cambio Climático y el Agua, ONU-Agua, Ginebra, p. 11.
- Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura, Organización de las Naciones Unidas-Agua. (2020). Informe Mundial de las Naciones Unidas sobre el desarrollo de los Recursos Hídricos 2020: Agua y Cambio climático. París, UNESCO.
- Peoples' Climate Summit, System change – not climate change. (s. f.). A People's Declaration from Klimaforum09.
- Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo. (2019). Objetivos de desarrollo sostenible. Recuperado el 29 de julio de 2022 de: <https://www.undp.org/content/undp/es/home/sustainable-development-goals.html>
- Resolución aprobada por el Consejo de Derechos Humanos 33/10. Los derechos humanos al agua potable y el saneamiento. A/HRC/RES/33/10, A/HRC/RES/33/10 6 (2016).
- Riechmann, J. (2018). Antropoceno, Gran Aceleración y perspectivas de colapso eco social, 12 de enero de 2018. Universidad Complutense de Madrid. Recuperado el 8 de diciembre de 2020, de: <https://www.ucm.es/data/cont/media/www/pag104576/2.%20Antropoceno,%20gran%20aceleraci%C3%B3n%20y%20perspectivas%20de%20colapso%20ecosocial.%20Jorge%20Riechmann.pdf>
- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, Comisión Nacional del Agua. (2015). Atlas del agua. Ciudad de México.
- Universidad Nacional Autónoma de México y Comisión Nacional de Derechos Humanos. (2018). Estudio sobre protección de ríos, lagos y acuíferos desde la perspectiva de los derechos humanos. (p. 313).
- Velayos Castelo, C., y Romero, J. (2021). Justicia climática para toda la comunidad biótica. En P. Villavicencio-Calzadilla y S. Borrás-Pentinat (Eds.), *Justicia climática. Visiones constructivas desde el reconocimiento de la desigualdad* (pp. 331–357). Tirant Lo Blanch.
- Whitmee, S., Haines, A., Beyre, C. et al. (2015). Safeguarding human health in the Anthropocene epoch: Report of The Rockefeller Foundation–Lancet Commission on planetary health. *The Lancet*, 386, 1978.

XII. Residuos agroindustriales del estado de Chiapas susceptibles a la generación de energía

ANAHI ARREAGA CANCINO*
ARACELY LÓPEZ GRIJALVA**
BELKIS SULBARÁN RANGEL***

DOI: <https://doi.org/10.52501/cc.178.12>

Resumen

En este capítulo se realizó una revisión bibliográfica sobre los residuos agroindustriales del estado de Chiapas susceptibles a la generación de energía, debido a que las actividades industriales, agrícolas y forestales en los últimos años se han incrementado y esto ha generado una gran cantidad de residuos agroindustriales, los cuales son poco aprovechados. En el año 2021 se reportó la generación de 2 718 969.61 toneladas de residuos en el estado de Chiapas, que en su mayoría son incineradas o vertidas a los cauces receptores. Estos residuos representan un gran potencial para generar energía y reducir la huella de carbono. Por tanto, el objetivo de esta investigación es evaluar el estado actual y los posibles usos, desde el punto de vista energéticos, que se les pueden dar a estos residuos. Dentro de la revisión los cultivos de caña de azúcar, plátano, maíz y café fueron los que más resaltaron, ya que producen una gran cantidad de residuos, tales como bagazos, rastrojos y cáscaras, que pueden ser aprovechados para la generación de energía gracias a su potencial energético. Se ha reportado que existen diferentes alter-

* Maestra en Ciencias de los Materiales Poliméricos. Universidad de Ciencias y Artes de Chiapas (Unicach), México. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0489-6014>

** Doctora en Materiales y Sistemas Energéticos Renovables. Instituto de Investigación e Innovación en Energías Renovables de la Universidad de Ciencias y Artes de Chiapas (Unicach), México.

*** Doctora en Ciencia de Materiales. Departamento de Estudios de Agua y la Energía, Centro Universitario de Tonalá, Universidad de Guadalajara, México. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5758-6140>

nativas de aprovechamiento, dentro de las que se incluyen los combustibles sólidos, líquidos y la gasificación. El aprovechamiento de los residuos agroindustriales en el estado de Chiapas puede ser una solución eficiente para la generación de energía renovable y la reducción de la huella de carbono. Las alternativas de aprovechamiento de los residuos agroindustriales representan una oportunidad para transformar un problema en una solución sostenible y aportar a la conservación del medio ambiente.

Palabras clave: *Aprovechamiento de residuos, transformación de energía, combustibles sólidos, combustibles líquidos, economía circular.*

Introducción

La población de México asciende a 126 014 024 personas, de acuerdo con los datos del censo de población y vivienda del 2020 con una tendencia de crecimiento de 1.1% (INEGI, 2020), por lo que el aumento poblacional anual obliga al incremento en la producción de alimentos y tiene un efecto directo en la producción de residuos sólidos generado como resultado de las actividades domésticas, agropecuarias o industriales. Por lo tanto, el déficit entre los recursos ecológicos y la superficie ecológicamente productiva necesaria para producir los recursos consumidos y absorber los residuos que generan de las actividades domésticas, agropecuarias o industriales es excesivo y va en aumento. De acuerdo con datos de la Red de Huella Global, en el 2018 fue de -1.2 hectáreas globales (Gha) (Global Footprint Network, 2023), por lo que la gestión integral de los residuos sólidos constituye una fuente de oportunidades para generar mercados y cadenas productivas formales (Heraz, 2012), así como para reducir el impacto de la huella de carbono, por medio del aprovechamiento de los desechos orgánicos producidos en la agroindustria y su posible implementación para la producción o su transformación en energía.

El estado de Chiapas cuenta con 39 tipos de cultivos cíclicos y perennes, los cuales generaron 6 179 476.4 de toneladas en el 2021 (SIAP, 2021). Dentro de los cultivos que pueden representar un aporte sensible al desarrollo económico y tecnológico del país, se encuentran la caña de azúcar, el plá-

tano, el maíz, el sorgo y el café, los cuales representan 85% de la producción agrícola del estado de Chiapas y, considerando que la industria agroalimentaria genera la mayor cantidad de residuos, aproximadamente 44% del volumen total en comparación con las demás industrias (Hodaifa García y Rodríguez-Pérez, 2018). Se estaría hablando de 2 337 994.089 toneladas de residuos obtenidos en el 2021 solamente de los cultivos seleccionados, por lo que buscar alternativas para la generación energética mediante el uso de estos residuos promovería su tratamiento, reuso y la extracción de componentes de valor agregado (Díaz-Montes, 2022). Por lo tanto, el objetivo de esta investigación es evaluar el estado actual de los residuos que se producen en mayor cantidad y proponer algunas alternativas de uso para la generación de energía y promover la economía circular.

Residuos agroindustriales en el estado de Chiapas

El estado de Chiapas se localiza al sureste de México, colinda al norte con Tabasco, al oeste con Veracruz y Oaxaca, al sur con el Océano Pacífico y al este con la República de Guatemala. De acuerdo con los datos proporcionados por el Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP), en 2021, los cultivos en Chiapas presentaron una producción total de 6 179 476.4 toneladas y, considerando que 44% se convierte en residuo, se están generando 2 718 969.62 toneladas, que podrían ser aprovechadas de forma parcial o total en la producción de energía; sin embargo, los cultivos con una producción mayor a 300 000 toneladas que pudiesen impactar en el número de residuos sólo son la caña de azúcar, el plátano, el maíz y el café los cuales generan aproximadamente 2 337 994 toneladas a partir de 85% del volumen total teórico de residuos. En la tabla 1 se enlistan los cultivos producidos en Chiapas en el 2021. El término *siniestrada* se refiere a la superficie de la cual no se obtuvo producción debido a que se perdió por alguna causa; sólo aplica para cultivos anuales, ya que los perennes se pueden recuperar en el año siguiente.

Tabla 1. *Producción agrícola del Estado de Chiapas, 2021*

<i>Cultivo</i>	<i>Sembrada (Ha)</i>	<i>Cosechada (Ha)</i>	<i>Volumen de producción (Ton)</i>
Caña de azúcar	32 572.50	32 539.25	2 970 132.33
Maíz en grano	690 207.92	688 517.92	1 288 651.52
Plátano	23 485.82	23 309.17	670 289.36
Café cereza	253 457.82	239 265.67	384 549.72
Mango	38 775.35	36 231.35	272 384.00
Papaya	2 089.53	2 004.03	157 957.12
Tomate rojo (jitomate)	1 624.72	1 624.72	80 489.63
Frijol	115 784.1	115 784.1	68 515.02
Sandía	1 732.73	1 732.73	36 748.58
Papa	1 920.12	1 920.12	30 385.88
Crisantemo (gruesa)	10.25	10.25	28 874.25
Sorgo grano	1 0542.32	9 729.32	24 546.84
Soya	12 904.3	12 904.3	24 057.50
Limón	2 960.45	2 541.9	16 476.12
Chile verde	2 145.37	2 145.37	16 470.35
Elote	784.3	784.3	15 466.06
Tomate verde	647.8	647.8	15 282.86
Aguacate	3 373.81	2 371.31	14 904.79
Naranja	1 927.85	1 760.75	11 438.85
Durazno	2 492.3	2 333.2	11 279.42
Cacao	18 475.9	17 526.4	10 404.21
Piña	366	359.5	7 851.8

Cebolla	219.3	219.3	4692.31
Ajonjolí	7797.5	7797.5	4319.03
Manzana	1203.9	986.35	3524.86
Sorgo forrajero en verde	167	167	3346.68
Granada	224.4	188.3	966.41
Pera	237	237	778.12
Copra	870	870	746.40
Melón	44.42	44.42	678.26
Lilium (gruesa)	0.3	0.3	636.90
Pepino	37.9	37.9	582.90
Arroz palay	343.8	343.8	563.55
Chile seco	798.3	798.3	444.52
Tabaco	174.38	174.38	354.54
Guayaba	68	62	327.98
Mandarina	72.45	52.95	273.40
Tejocote	22.5	17.9	51.02
Trigo grano	43	43	33.31

Fuente: Información del Anuario Estadístico De La Producción Agrícola, 2021.

Diagnóstico de los residuos viables para conversión energética

Los residuos evaluados aquellos que han sido generados luego de una actividad agrícola o industrial, tales como bagazos, rastrojos, cáscaras y otros, que en su mayoría son incinerados o descargados sin previo tratamiento en los cuerpos de agua o dejados a su degradación a cielo abierto, lo que

contribuye a la degradación del ecosistema y a la propagación de enfermedades. La quema repetitiva de los residuos o de alta intensidad induce efectos negativos sobre el suelo, porque va reduciendo la materia orgánica y puede generar erosión; se pierde así la capacidad de producción del suelo y la capacidad de infiltrar agua y abastecer las napas freáticas (Pérez, 2015). Aunque algunos productores utilizan estos residuos como abono verde o alimento para animales en sus plantaciones (Fernández *et al.*, 2001), su potencial de aprovechamiento y valorización aún es limitado. Este proyecto busca desarrollar soluciones innovadoras y sostenibles para el manejo adecuado de estos residuos, promoviendo la economía circular y la preservación del medio ambiente del estado de Chiapas, cuyo segundo sector económico importante, con 13% de participación, es la agricultura (INEGI, 2023). La elaboración de combustibles sólidos se realiza mediante la compactación de los residuos agroindustriales en forma de briquetas o *pellets*, que pueden ser quemados para generar energía térmica y utilizarse en la preparación de alimentos. La elaboración de combustibles líquidos implica la producción de biocombustibles a partir de los residuos agroindustriales, que pueden ser utilizados en motores de combustión interna. Por último, la gasificación es un proceso en el que los residuos agroindustriales se calientan en ausencia de oxígeno para producir gas de síntesis, que puede ser utilizado como combustible o ser parte del sistema de generación eléctrica.

Como se observa en la tabla 2, los cultivos que producen una cantidad de residuos mayor a 50% en la cosecha y poscosecha son el maíz y el plátano, por lo que el uso de estos desperdicios generaría un aporte significativo a la cadena productiva y, por ende, a la economía integral de Chiapas. El cultivo de caña de azúcar, al ser el de mayor producción del 2021, genera un aporte significativo de 836 983.29 toneladas aproximadamente en forma de rastrojo y bagazo, como residuo secundario obtenido en el procesamiento del producto principal, que es el azúcar. La cascarilla del cultivo de café representa cerca de 43% del peso del fruto (Arias y Meneses Cruz, 2016) y 39% del residuo de la producción, por lo que su volumen es importante, ya que Chiapas se presenta como el primer productor de café cereza a nivel nacional en 2021 con 384 549.72 toneladas (SIAP, 2021), de las cuales se obtienen aproximadamente 149 974.39 toneladas de residuos.

Tabla 2. Residuos agrícolas con potencial para su transformación o conversión energética

Cultivo	Tipo de residuos	Imagen	Porcentaje de Residuo (%)	Referencia
Caña de azúcar				(Traina, Hernández y Martínez, 2014)
	Cogollo		8.44	
	Rastrojo		19.74	
Plátano				(Giraldo et al., 2014)
	Cáscaras		7.75	
	Raquis		0.01	
	Pseudotallo		63.50	
Maíz Grano				(Dhugga, 2007)
	Rastrojo		50	
	Olote		17%	(Domínguez y Loor, 2018)
Café	Cáscaras		39%	(Castro, 2020)

Fuente: Elaboración propia.

Usos alternativos de los residuos agroindustriales

La gestión adecuada de los residuos es fundamental para reducir su impacto en el medio ambiente y maximizar su valor como recurso energético. En la tabla 3 se muestran los volúmenes de producción de residuos estimados que podrían ser aprovechados para la producción y conversión de energía con el objetivo de mejorar su gestión, a fin de lograr un total aproximado de 2 328 002.40 toneladas. Este conocimiento es esencial para diseñar políticas y estrategias efectivas de gestión de residuos y fomentar la transición hacia un modelo de economía circular, por lo que en la tabla 4 se presentan las alternativas de aprovechamiento de los residuos generados de los cultivos de caña de azúcar, plátano, maíz, y café, donde se considera la conversión a la producción de energía o biocombustibles como el etanol y los *pellets* o briquetas respectivamente, así como su transformación termoquímica, como en el caso de la gasificación o cogeneración mediante el uso de calderas.

Tabla 3. Volumen de residuos aproximados susceptibles para conversión energética

Cultivo	Volumen producción (Ton)	% de residuo	Volumen de residuo (Ton)
Plátano	670 289.36	71.26	477 648.20
Maíz	1 288 651.52	67.00	863 396.52
Café cereza	384 549.72	39.00	149 974.39
Caña de azúcar	2 970 132.33	28.18	836 983.29

Fuente: Elaboración propia.

En la tabla 3 se observa que el residuo con mayor volumen es el maíz, seguido por la caña de azúcar, el plátano y el café cereza. Estos residuos actualmente son utilizados en diferentes aplicaciones; sin embargo, su explotación aún no representa un porcentaje significativo en su manejo. A continuación se presentan algunos usos actuales de estos residuos y los resultados que se han reportado:

Ensilaje en la alimentación de animales

El ensilaje de rastrojo de maíz contiene 36.4% de materia seca, 8.8% de proteína total, 69% de fibra detergente neutra y 2.1 Mcal/Kg de energía metabolizable, por lo que se presenta como una alternativa prometedora de bajo costo con alto valor proteico; mientras tanto, el ensilaje de bagazo/rastrojo de caña contiene un elevado contenido de azúcar y reducido contenido de almidón, lo que limita la digestibilidad de la fibra (50% a 68%), por lo que no se recomienda su utilización como única fuente de forraje en la alimentación del ganado bovino (Peña, 2022). El uso de la pulpa de café en el ensilaje de vacas lecheras y bovinos destinados a la producción de carne puede generar importantes beneficios económicos al ser una fuente adicional de alimento a bajo costo, lo que contribuye a reducir los gastos de alimentación en sistemas de producción animal. Esto es especialmente relevante en países en desarrollo, donde los costos de producción de leche y carne pueden representar una carga financiera significativa. Experimentos de alimentación con pulpa de café en peces, pollos, corderos y conejos determinaron el aumento del peso corporal de forma similar e incluso mejorada al compararse con los alimentados con concentrados comerciales (Rathinavelu y Graziosi, 2005).

Infusiones o aperitivos

Las infusiones o tés obtenidos a partir de la cáscara de café, además de tener un sabor afrutado, ligeramente ácido y dulce, son ricas en fibra y energéticas y contienen propiedades antioxidantes, diuréticas y una notable concentración de minerales y potasio, lo que las convierte en un producto altamente saludable y de beneficio para el consumo humano (Andrade, 2020).

Los palmitos, los cuales son considerados un alimento delicado y sabroso debido a sus propiedades bajas en calorías y grasas, son una buena fuente de fibra dietética y contienen vitaminas C y B6 y minerales esenciales como potasio y manganeso, además de presentar propiedades antioxidantes y diuréticas (Castañeda, 2010).

Biofertilizantes

La composta es el resultado de la fermentación aeróbica, es decir, de la presencia de aire en una mezcla de materias primas orgánicas —en este caso los rastrojos y los bagazos de los cultivos de maíz y caña respectivamente (Céspedes, 2004)— que permite reciclar los nutrientes y generar un ahorro de dinero si se utiliza como fertilizante con el fin de proporcionar nutrientes esenciales para el crecimiento y desarrollo de las plantas. El uso de las cáscaras secas de café en las compostas aumenta el porcentaje de nitrógeno; sin embargo, disminuye el pH de la tierra por la presencia de ácidos generados en la descomposición del material (Hidayat *et al.*, 2020). El uso de lixiviado de raquis de plátano como fertilizante edáfico muestra una reducción del 32% de la bacteria de suelo gramnegativa *Ralstonia solanacearum*, por lo que se presenta como una opción económica y sostenible para granjas plataneras (Álvarez *et al.*, 2013).

Construcción

Los residuos de maíz y caña son utilizados como material agregado en la construcción de bloques en los que los porcentajes de suplemento con mayor resistencia no superan la concentración de 25%. Así se obtienen resistencias superiores a los 42 kg/cm². De acuerdo con la norma técnica ecuatoriana (NTE) INEN 3 066 (2016), este tipo de estructura son bloques clase B, óptimos para uso en paredes exteriores de carga con revestimiento (Domínguez y Loor, 2018). Por ello el empleo de este tipo de bloques en la construcción reduciría de forma positiva las emisiones de dióxido de carbono (CO₂) generadas en la industria de la construcción.

Alternativas de generación energética a partir de los residuos

En el ámbito de la generación de energía a partir de biomasa, es fundamental realizar un acondicionamiento previo de los residuos estudiados antes

de su conversión y utilización en sistemas de gasificación, de pellets o briquetas, o bien antes de ser transformados en biocombustibles. Dentro de este proceso de tratamiento previo, se consideran dos aspectos principales: la trituración, que implica un tratamiento mecánico con el objetivo de fraccionar la materia prima de segunda generación y facilitar su manejo para el segundo paso: el tratamiento térmico, cuyo objetivo es eliminar la humedad excesiva presente en los residuos biomásicos, la cual no debe superar 50% en el caso de la gasificación y un máximo de 20% para el peletizado o las briquetas. Para lograr estos niveles de humedad, se aplican temperaturas que van desde los 110 hasta los 180 °C. Es importante mencionar que este tratamiento térmico es especialmente aplicable a materiales lignocelulósicos susceptibles a procesos de aprovechamiento energético mediante fermentación, como el rastrojo de sorgo y maíz, el bagazo de caña de azúcar, las cáscaras de café, el pseudotallo y el raquis de plátano.

En la tabla 4 se puede apreciar que el rastrojo/elote de maíz presenta el poder calorífico más elevado entre estos residuos, aunque su valor se sitúa por debajo de 15% del poder calorífico de la madera de pino (21.32 MJ/kg) (Orémusová, Tereňová y Réh, 2014). No obstante, este residuo tiene un gran potencial no sólo como combustible sólido en forma de *pellets* o briquetas, sino que también se podría haber producido una cantidad de hasta 107.92 m³ de bioetanol en el año 2021. Aunque el rastrojo de caña tiene un poder calorífico relativamente bajo (3 165.16 KJ/Kg), posee un potencial considerable para ser convertido en bioetanol de segunda generación debido a su abundancia volumétrica.

El residuo del plátano se considera principalmente para la cogeneración de energía en las granjas plataneras ya que permite la fácil recolección y manejo de la materia prima (Gutiérrez *et al.*, 2020). Aunque es posible la obtención de etanol a partir de este residuo, es muy baja la relación bioetanol/biomasa comparada con las demás materias primas. Las cáscaras de café son una opción viable como combustible sólido debido a su disponibilidad y poder calorífico similar al del maíz; sin embargo, el proceso de secado de este recurso requiere una mayor cantidad de energía, lo que resulta en un balance energético negativo cuando se utiliza el secado mecánico (Rodríguez y Zambrano, 2010). No obstante, se podría mejorar el balance energético al optar por el secado solar o aprovechar parte de los patios de secado

al sol, comúnmente utilizados para secar los granos de café. De esta manera, se podría aprovechar directamente el potencial energético de estas cáscaras en los hogares de producción cafetalera.

El uso de residuos agroindustriales conlleva beneficios socioeconómicos y ambientales, pero su utilización directa se ve dificultada por las características propias de la biomasa residual, la cual requiere tratamientos previos. Una de las alternativas más prometedoras es la fermentación de estos residuos para obtener bioetanol. No obstante, es necesario investigar y desarrollar en mayor profundidad las diferentes vías de transformación para optimizar el proceso de fermentación. Además, se debe explorar la generación de energía mediante la gasificación de estos residuos.

Tabla 4. *Alternativas energéticas de aprovechamiento de residuos*

Cultivo	Tipo de residuos	Alternativas de uso	Poder calorífico superior (KJ/k)	Relación bioetanol/biomasa*	Residuo (Ton)	Bioetanol (L)	Referencias
Caña de azúcar	Rastrojo/Cogollo	Pellets, briquetas, bioetanol	3 165.1	0.186	836 983.29	155 678.89	(Fuentes, 2015; Garcés y Martínez, 2007; Triana-Hernández <i>et al.</i> , 2013)
Maíz	Rastrojo/Olote	Pellets, briquetas, bioetanol	17 965.0	0.125	863 396.51	107 924.56	(Casa, 2018; Fonseca, Rodríguez y Camargo, 2017)
Plátano	Raquis/Pseudotallo	Etanol. Cogeneración de energía por medio de gasificación	12 895.0	0.100	477 648.19	47 764.81	(Escalante y Fuentes, 2014; Palacios, 2017; Rendón <i>et al.</i> , 2015)
Café	Cáscaras	Biogás, briquetas, bioetanol	17 572.8	0.192	149 974.39	28 795.08	(Arias y Meneses Cruz, 2016; Braham y Bressani, 1978)

*ml de etanol/ gr de biomasa.

Fuente: Elaboración propia.

Conclusiones

En el estado de Chiapas se determinó que existen diversos tipos de cultivos y que éstos generan grandes cantidades de residuos poco utilizados. Los cultivos que más generan residuos son la caña de azúcar, el maíz, el plátano

y el café, los cuales presentan características importantes que hay que tomar en cuenta para su aprovechamiento, como su elevado contenido de humedad; sin embargo, existen alternativas, como el secado solar, para el pretratamiento y acondicionamiento. Lograr que estos residuos se conviertan en materia prima de otros procesos de generación de energía es factible y contribuirá a la economía circular de los procesos de producción agrícolas e industriales de estos cultivos en esta zona del país.

Bibliografía

- Álvarez, E., Pantoja, A., Gañán, L., et al. (2013). *Producción de lixiviado de raquis de plátano en el Eje Cafetero de Colombia [Producing Lixivates from the Plantain Rachis in the Colombian Coffee Belt]*. C. FAO, Valle del Cauca. Colombia.: FAO.
- Andrade, D. S. (2020). *Producción y comercialización de blends de té hechos a base de cáscara de café* (Tesis de Licenciatura en Administración). Universidad de San Martín de Porres, Perú.
- Arias, R. A., y Meneses Cruz, J. D. (2016). *Caracterización físico-química de residuos agroindustriales (cascarilla de arroz y cascarilla de café), como materia prima potencial para la obtención de bioetanol Laboratorios de Química UNAN-Managua I-II semestre 2016* (Tesis de Licenciado en Química Industrial). Universidad Nacional Autónoma de Nicaragua, Managua, Nicaragua.
- Braham, J., y Bressani, R. (1978). *Pulpa de café: composición, tecnología y utilización*. CIID. Ottawa, ON, CA.
- Carchi, D. E. (2014). *Aprovechamiento de los Residuos Agrícolas provenientes del cultivo de Banano para obtener Nanocelulosa* (Tesis de Ingeniería Química). Universidad de Cuenca, Ecuador.
- Casa, E. Y. (2018). *Evaluación del potencial de producción de bioetanol de la biomasa lignocelulosa de la caña de maíz por hidrólisis ácida* (Tesis de Química de Alimentos). Universidad Central del Ecuador, Ecuador.
- Castañeda, C. A. (2010). *Obtención de palmitos a partir del corazón del pseudotallo del plátano* (Tesis de Química). Universidad del Quindío, Colombia.
- Castro, J. J. (2020). *Establecimiento de un protocolo para el uso potencial del residuo de la cereza del café generado en la vereda "El diamante" (Cundinamarca) como biocomposito, a partir de una revisión sistemática* (Tesis de Ingeniero Ambiental). Universidad del Bosque, Colombia.
- Céspedes, M. (2004). Bases técnicas para la producción de compost. *Tierra Adentro*, 59. <https://hdl.handle.net/20.500.14001/6129>
- Dhugga, K. (2007). Maize biomass yield and composition for biofuels. *Crop Science*, 47(6), 2211-2227.

- Díaz-Montes, E. (2022). Residuos agroalimentarios residuos agroalimentarios ¿Qué son? ¿Quién los genera? Y ¿Por qué son valiosos? *Frontera Biotecnológica*.
- Domínguez, S. G., y Loor, K. F. (2018). *Uso de los residuos del cultivo de maíz (Zea Mays), como alternativa sostenible para la elaboración de bloques, parroquia Boyacá* (Tesis de Ingeniero en Medio Ambiente). Escuela Superior Politécnica Agropecuaria de Manabí Manuel Félix López, Ecuador.
- Escalante, J., y Fuentes, H. (2014). *Estudio experimental de obtención de bioetanol a partir de residuos agrícolas de banano orgánico en Piura* (Tesis de Ingeniería Industrial y de Sistemas). Universidad de Piura, Perú.
- Fernández, F. V., Pargas, E. P., de Oca, R. V. M., et al. (2001). Efecto de la suplementación con seudotallo de plátano sobre la salud y el peso al sacrificio de cerdos comerciales. *Revista de Producción Animal*, 13(1), 42-45.
- Fonseca, S. D., Rodríguez, H. A., y Camargo, G. (2017). Caracterización de residuos de maíz del municipio de Ventaquemada, Colombia. *Avances en Ciencias e Ingeniería*, 8(2), 29-36.
- Fuentes, E. J. (2015). *Evaluación de la paja de caña de azúcar como complemento bio-combustible al bagazo de caña en un ingenio azucarero* (Tesis). Universidad de San Carlos de Guatemala, Guatemala.
- Garcés, R. V., y Martínez, S. V. (2007). *Estudio del poder calorífico del bagazo de caña de azúcar en la industria azucarera de la zona de Risaralda* (Tesis de Licenciatura). Universidad Tecnológica de Pereira, Colombia.
- Giraldo, J. L., Cuarán, J. C. C., García, L. V. A., et al. (2014). Usos potenciales de la cáscara de banano: elaboración de un bioplástico. *Revista Colombiana de Investigaciones Agroindustriales*, 1(1), 7-21.
- Global Footprint Network. (2023). World Development Indicators. Retrieved from https://data.footprintnetwork.org/?_ga=2.95643228.1143411555.1680807467-499894092.1680807467#/
- Gutiérrez, J. F., Revilla, J. M., Toro, S. B. et al. (2020). Localización y producción potencial de una planta de pirolisis para la valorización de residuos agrícolas. *Polo del Conocimiento: Revista científico-profesional*, 5(12), 265-278.
- Heraz, A. (2012). *Estudio de gasificación mediante un prototipo experimental para el tratamiento termoquímico de residuos orgánicos* (Tesis de Maestro en Ciencias en Ingeniería Química). Universidad Iberoamericana Mexico.
- Hidayat, E., Taizo, M., Harada, H., et al. (2020). Evaluate of Coffee Husk Compost. *International Journal of Food, Agriculture, and Natural Resources*, 1, 37-43. <https://doi.org/10.46676/ij-fanres.v1i1.8>
- Hodaifa, G., García, C. A., y Rodriguez-Perez, S. (2018). Revalorization of agro-food residues as bioadsorbents for wastewater treatment Aqueous Phase Adsorption (pp. 249-282): CRC Press.
- INEGI. (2020). Censos y Conteos de Población y Vivienda. <https://www.inegi.org.mx/temas/estructura/>
- . (2023). Producto Interno Bruto por Entidad Federativa. Año base 2013. <https://>

- www.inegi.org.mx/app/tabulados/default.aspx?pr=17&vr=7&in=2&tp=20&wr=1&cno=2
- Orémusová, E., Tereňová, L., y Réh, R. (2014). Evaluation of the gross and net calorific value of the selected wood species. *Advanced Materials Research*, 1001, 292-299. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/amr.1001.292>
- Palacios, M. G. (2017). *Caracterización química de la biomasa procedente de las hojas, pseudotallo, raquis y pseudopeciolo de la planta de banano y su relación con el poder calorífico* (Tesis de Ingeniero Químico). Universidad de Cuenca, Ecuador.
- Peña, K. X. (2022). *Alternativas de alimentación con ensilaje de rastrojo de maíz y residuos de cosecha de caña de azúcar para vacas en producción de leche en el Trópico* (Tesis de Médico Veterinario Zootecnista). Universidad Técnica de Babahoyo, Ecuador.
- Perez, C. (2015). Rastrojo de cultivos y residuos forestales. Programa de transferencia de prácticas alternativas al uso del fuego en la región del Bio-Bio. *Boletín INIA-Instituto de Investigaciones Agropecuarias*, 308. <https://hdl.handle.net/20.500.14001/7856>
- Rathinavelu, R., y Graziosi, G. (2005). Posibles usos alternativos de los residuos y subproductos del café. *Uso de los residuos y subproductos del café*.
- Rendón, J. C. S., Serna, L. V. D., Piedrahita, V. H., et al. (2015). Análisis tecno-económico de una biorefinería a partir de residuos del plátano. *Revista de la Facultad de Ciencias Químicas*, (13), 32-39.
- Rodriguez, N., y Zambrano, D. (2010). Los subproductos del café: fuente de energía renovable. *Avances Tecnicos 393 Cenicafe*, 1-8. <https://doi.org/10.38141/10779/0393>
- SIAP. (2021). Estadística de Producción Agrícola. http://infosiap.siap.gob.mx/gobmx/datosAbiertos_a.php
- Traina, O., Hernández, T., y Martínez, V. (2014). Caracterización de los residuos de la cosecha de la caña de azúcar almacenados a granel. *Red de Revistas Científicas de América Latina, el Caribe, España y Portugal*, 48.
- Triana-Hernández, O., León-Martínez, T. S., Dopico-Ramírez, D. et al. (2013). Paja de la caña de azúcar. Sus usos en la actualidad. *ICIDCA. Sobre los Derivados de la Caña de Azúcar*, 47(2), 13-22.

Sobre los autores

Agustín Camacho Rodríguez

Licenciado Biólogo Pesquero por la Universidad Autónoma de Sinaloa, en la Facultad de Ciencias del Mar (Facimar), unidad Mazatlán. Consultor ambiental con experiencia en levantamientos faunísticos, con especialidad en ictiofauna. Responsable del proyecto de registro y monitoreo de la fauna de los humedales de la presa El Cajón y La Rucia del Laboratorio de Estudios Ambientales. Estuvo adscrito al Departamento de Estudios en Agua y la Energía en el Centro Universitario de Tonalá de la Universidad de Guadalajara. Autor y coautor de una docena de artículos de divulgación en congresos de zoología e ictiología.

GOOGLE SCHOLAR: <https://scholar.google.com/citations?user=x3iXMFEEAAAJ&hl=es>

RESEARCHGATE: <https://www.researchgate.net/scientific-contributions/Agustin-Camacho-Rodriguez-2067123941>

Carlos Vladimir Muro Medina

Profesor de asignatura en el Centro Universitario de Tonalá. Licenciado en Biología por el Centro Universitario de Ciencias Biológicas y Agropecuarias (CUCBA) de la Universidad de Guadalajara. Maestro en Ciencias en Biología Molecular por el Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica (IPICYT). Doctor en Ciencias en Innovación Biotecnológica por el Centro de Investigación y Asistencia en Tecnología y Diseño del Estado de Jalisco (CIATEJ). Experiencia en investigación: filogenia molecular de hongos superiores, aislamiento e identificación de

levaduras con marcadores moleculares, caracterización genética con *Arabidopsis thaliana*, obtención de extractos vegetales con actividad antimicrobiana y aislamiento e identificación de hongos fitopatógenos. Colaborador del proyecto de registro y monitoreo de la fauna de los humedales de la presa El Cajón y La Rucia del Laboratorio de Estudios Ambientales.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2626-7179>

GOOGLE SCHOLAR: <https://scholar.google.com/citations?user=625S0iMAAAAJ&hl=en&oi=ao>

Edith Xio Mara García

Profesora investigadora titular A del Departamento de Estudios del Agua y de la Energía del Centro Universitario Tonalá. Doctora en Geología por la Universidad de Salamanca. Miembro del SNI desde el año 2010 hasta la actualidad. Ha publicado como autora y coautora en 36 artículos científicos en revistas de reconocido prestigio, 10 capítulos de libros y 30 resúmenes publicados en memorias de congresos nacionales e internacionales. Ha participado en 11 proyectos de investigación. Fue responsable de los proyectos “Estudio del Agua de Agua Subterránea del Área Metropolitana de Guadalajara”.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7655-8014>

RESEARCHGATE: <https://www.researchgate.net/profile/Edith-Garcia-5>

Eduardo Juárez Carrillo

Profesor investigador titular de tiempo completo en el Departamento de Ecología de la Universidad de Guadalajara. Es biólogo egresado de la antigua Facultad de Ciencias de la Universidad de Guadalajara en el año 1989. Trabaja en la Universidad de Guadalajara desde el año 1990, siempre adscrito al actual Departamento de Ecología. Es profesor de las materias de Ecofisiología, Nutrición de animales acuáticos y Acuicultura del plan pasado, y actualmente es profesor de las materias de Ciencias de la Tierra II y Acuicultura del plan nuevo de estudios. Se desempeña dentro del Laboratorio de Ecosistemas Marinos y Acuicultura (LEMA). Actualmente es Director del Instituto de Limnología de la Universidad de Guadalajara, en Chapala, Ajjic. Sus trabajos de investigación versan sobre el estudio y dinámica de lagos, presas y cuerpos de agua eutrofizados en el Occidente de México, producción masiva de microalgas en fotobiorreactores, fisiología y ontogenia de peces

nativos del lago de Chapala (charales), fisiología y ontogenia de peces nativos del lago de Chapala (charales), producción de tilapia y bagre para la cultura acuicultura.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8158-3943>

GOOGLE SCHOLAR: <https://scholar.google.com/citations?user=hXHvmoYAAAJ&hl=es>

RESEARCHGATE: <https://www.researchgate.net/profile/Eduardo-Juarez-Carrillo>

Aida Alejandra Guerrero de León

Profesora investigadora titular A de tiempo completo definitivo. Candidato a SIN y perfil PROMEP, adscrita al Departamento de Estudios del Agua y la Energía en el Centro Universitario de Tonalá (CUT) de la Universidad de Guadalajara. Responsable del Laboratorio Estudios Ambientales en el Instituto de Energías Renovables del CUT. Doctora en Biosistemática, Ecología y Manejo de Recursos Naturales. Maestra en Ciencias en Salud Ambiental. Licenciada en Biología por la Universidad de Guadalajara. Sus líneas de investigación son: toxicología del agua y sustentabilidad. Experiencia como consultor ambiental, investigaciones y proyectos relacionados con impacto ambiental, educación en manejo de residuos y calidad de agua en cuerpos superficiales ríos, arroyos y presas.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3998-2649>

ACADEMIA: <https://independent.academia.edu/AIDAALEJANDRAGUE-RRE-RODELEON>

María Azucena Arellano Avelar

Docente en la carrera de Ingeniería en Energía y encargada del Laboratorio de Estudios Ambientales. Adscrita al Departamento de Estudios en Agua y la Energía en el Centro Universitario de Tonalá (CUTonalá) de la Universidad de Guadalajara. Doctora en Movilidad Urbana, Transporte y Territorio. Maestra en Ciencias de la Salud Ambiental y Licenciada en Biología por la Universidad de Guadalajara. Consultora ambiental experta en manejo de residuos, calidad del aire y ruido ambiental. Cuenta con varias publicaciones sobre ruido, calidad ambiental, educación ambiental para la sustentabilidad y movilidad urbana.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5041-9430>

Walter Ramírez Meda

Profesor investigador titular B con perfil PRODEP, adscrito al Departamento de Ingeniería de Proyectos en el Centro Universitario de Ciencias Exactas e Ingenierías de la Universidad de Guadalajara. Actualmente es Jefe del Laboratorio de Pruebas del Centro de Estudios y Proyectos Ambientales de la Universidad de Guadalajara. Estudió la Licenciatura de Ingeniería Química. Tiene una Maestría en Ingeniería de Proyectos y el Doctorado en Ingeniería y Tecnología en la Universidad de Guadalajara. Experto en proceso y control de calidad. Es coautor de libros y autor de artículos en revistas indexadas sobre Ingeniería Ambiental, Ingeniería Aúmica y de Procesos Industriales. Ha participado como coordinador de proyectos de evaluación de contaminación de aguas, evaluación de contaminación de subsuelo y calidad de agua potable de municipios y empresas.

ORCID: <https://orcid.org/0009-0000-7558-6403>

RESEARCHGATE: <https://www.researchgate.net/scientific-contributions/Walter-Ramirez-Meda-2122925012>

Rodolfo Omar Arellano Aguilar

Profesor investigador titular A. Profesor de carrera titular A de tiempo completo definitivo. Perteneció al SNI, nivel 1. Departamento de Ecología y Recursos Naturales. Facultad de Ciencias. Universidad Autónoma de México. Doctor en Ciencias Biológicas y Licenciado en Biología por la UNAM. Líneas de investigación principales: evaluación de riesgo ecológico, ecotoxicología y monitoreo ambiental. Artículos publicados-aceptados arbitrados: 8. Libros: 1. Capítulos en libro: 8. Informes técnicos: 8. Total de citas, excluyendo autocitas: 77. Tesis dirigidas, concluidas: 7; en proceso, licenciatura: 1; maestría: 3; cursos impartidos: 2; posgrado: 5.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9519-6533>

GOOGLE SCHOLAR: <https://scholar.google.com.mx/citations?user=Fh8OltYAAA&hl=es>

RESEARCHGATE: <https://www.researchgate.net/profile/Omar-Arellano-Aguilar>

Alberto Daniel Rocha Muñoz

Profesor asociado B de tiempo completo definitivo. Miembro del SNI, nivel 1. Perfil PROMEP. Departamento de Ciencias de la Salud-Enfermedad como Proceso Individual. Centro Universitario de Tonalá. Posdoctorado en Farmacología Clínica por la Universidad de Guadalajara. Doctor en Ciencias Médicas. Universidad de

Colima. Maestría en Ciencias Médicas por la Universidad de Colima. Licenciado en Medicina por la Universidad Juárez del Estado de Durango. Líneas de investigación: biomedicina y salud ambiental. Publicación de artículos científicos y libros en temas de enfermedades crónico-degenerativas y riesgos en salud por contaminantes ambientales.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1173-1736>

GOOGLE SCHOLAR: <https://scholar.google.es/citations?user=uw2KM9cAAA&hl=es>

Anahí Arreaga Cancino

Maestra en Ciencias de los Materiales Poliméricos por el Centro de Investigación Científica de Yucatán (CICY). Obtuvo la Licenciatura de Ingeniería en Energía por la Universidad Politécnica de Chiapas (UP). Se ha desempeñado como profesora de diversas asignaturas a nivel Licenciatura y en la actualidad es estudiante del Doctorado en Materiales y Sistemas Energéticos Renovables por la Universidad de Ciencias y Artes de Chiapas (Unicach). Ha publicado capítulos de libro referentes al uso de biomasa y las perspectivas de su uso en la editorial de la Universidad Tecnológica de Tabasco. Sus últimas publicaciones son *Energía, medio ambiente y sustentabilidad* (2022), por Lenin Martínez Pérez, José Gilberto Torres Torres, Adib Abiu Silahua Pavón y Anahí Arreaga Cancino, editado por la Universidad Tecnológica de Tabasco; “Elaboración de ecoblocks con cenizas de biomasa residual local”, por Zaritma Yamilet Montejo García, Anahí Arreaga Cancino y Oswaldo Arturo García Ledesma; *Desarrollo de proyectos sustentables y energías renovables en el sureste mexicano*, (2021), editado por Universidad Tecnológica de Tabasco; “Caracterización de biomasa residual susceptible para procesos termoquímicos”, por J. G. Gómez-Reyes y A. Arreaga-Cancino; *Desarrollo energético, medio ambiente y sostenibilidad en el sureste de México* (2020), Editorial Académica Española.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0489-6014>

GOOGLE SCHOLAR: <https://scholar.google.com/citations?user=xc0a69MAAA&hl=es>

Aracely López Grijalva

Doctora en Materiales y Sistemas Energéticos Renovables por la Universidad de Ciencias y Artes de Chiapas. Obtuvo la Maestría en Materiales y Sistemas Energéticos Renovables en la misma universidad y la Licenciatura en Energía en la Uni-

versidad Politécnica de Chiapas. Se ha desempeñado como profesora investigadora de tiempo completo en el Instituto de Investigación e Innovación en Energías Renovables de la Universidad de Ciencias y Artes de Chiapas. En la actualidad pertenece al SNI del Conacyt; también es miembro del Sistema Estatal de Investigadores del Estado de Chiapas.

Sus trabajos de investigación se encuentran dentro de la línea de investigación de modelación y optimización de materiales, procesos y sistemas energéticos renovables. Sus últimas publicaciones son “Unsteady numerical modeling, experimental validation and optimization of a solar air heater based on the second law of thermodynamics using genetic algorithm”, *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry* (2023); “Entropy generation minimization and nonlinear heat transport in MHD flow of a couple stress nanofluid through an inclined permeable channel with a porous medium, thermal radiation and slip”, *Heat Transfer* (2020); “Optimization of MHD nanofluid flow in a vertical microchannel with a porous medium, nonlinear radiation heat flux, slip flow and convective-radiative boundary conditions”, *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry* (2019).

ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-9475-8201>

GOOGLE SCHOLAR: https://scholar.google.com/citations?hl=es&user=9jtDy-FMAAAAJ&view_op=list_works&sortby=pubdate

Belkis Sulbarán Rangel

Doctora en Ciencia de Materiales por la Universidad de Guadalajara, México. Posee el título en Ingeniería Forestal de la Universidad de los Andes Mérida-Venezuela y una Maestría en Ciencias de Productos Forestales por la Universidad de Guadalajara. Es profesora e investigadora de la misma universidad en el Centro Universitario de Tonalá (CUTonalá). Pertenece al SNI, nivel II. Realiza proyectos sobre aprovechamiento de residuos agrícolas y forestales con enfoque en biorrefinerías para la obtención de materiales avanzados y biocombustibles. Trabaja con el uso de tecnologías sustentables para el tratamiento de aguas residuales y purificación de agua utilizando materiales a base de celulosa y nanotecnología. Adicionalmente está realizando un proyecto de análisis de calidad de cuerpos de agua enfocados en contaminantes emergentes, microplásticos y teledetección. Sus últimas publicaciones son “Water Hyacinth valorization after organosoly fractionation: Cellulose fiber and anaerobic digestion”, *Waste and Biomass Valorization Journal* (2023); “Treatment of Tequila Vinsasse Mixed with Domestic Wastewater

in Two Types of Constructed Wetlands”, *Water Science and Technology Journal* (2023); “Biogas production by sediments from Santiago River, México: A proteomic analysis of Euryarchaeota consortia”, *Microorganisms Journal* (2023).

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5758-6140>

GOOGLE SCHOLAR: https://scholar.google.com/citations?hl=es&user=Nk_ctQUAAAAJ

RESEARCHGATE: <https://www.researchgate.net/profile/Belkis-Sulbaran>

Abril Adriana Angulo Sherman

Doctora en Ciencias en Ingeniería y Física Biomédicas por el Centro de Investigación y Estudios Avanzados del Instituto Politécnico Nacional (IPN), unidad Monterrey. Posee una Maestría en Ciencia en Ingeniería y Física Biomédicas por el Cinvestav, unidad Monterrey. Es Licenciada en Física por la Universidad de Guadalajara. Se ha desempeñado como Docente en el Centro de Investigación y Desarrollo en Educación Bilingüe de la Universidad Autónoma de Nuevo León, además, fue coordinadora de posgrado y continúa trabajando como profesora en los programas de pregrado y posgrado del Departamento de Estudios del Agua y de la Energía del Centro Universitario de Tonalá de la Universidad de Guadalajara. En conjunto con lo anterior se desempeña como investigadora en dinámica molecular del agua y estudio de propiedades dieléctricas y termodinámicas de la misma sustancia; también investiga sobre la generación de biocombustibles. Entre sus trabajos se encuentran publicados “Isochoric containers and its frontier between cryopreservation and sterilization”, *CryoLetters* (2019); “Ionic transport in glycerol-water mixtures”, *Ionics* (2015); “Sterilization by Cooling in Isochoric Conditions: The Case of Escherichia coli”, *Plos One* (2015).

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9529-9882>

GOOGLE SCHOLAR: https://scholar.google.com/citations?user=Fe_Nm8gAAAJ&hl=es&authuser=1&oi=ao

Valentín Flores Payán

Doctor en Ciencia y Tecnología en Ingeniería Ambiental por el Centro de Investigación y Asistencia en Tecnología y Diseño del Estado de Jalisco (CIATEJ). Tiene una Maestría en Ciencia y Tecnología en Ingeniería Ambiental por el CIATEJ. Además es Licenciado en Ingeniería Mecatrónica por el Centro de Enseñanza Técnica Industrial (CETI). Se desempeña actualmente como docente e investigador en el

Departamento de Ciencias Básicas y Aplicadas del Centro Universitario de Tonalá de la Universidad de Guadalajara. Sus líneas de investigación son degradación de contaminantes emergentes utilizando técnicas de oxidación avanzada y la generación de biocombustibles. Entre sus últimos trabajos publicados se encuentran “Proposal degradation pathway of BPA during ozone reaction, *Nova Scientia* (2023). “GIS, Multivariate Statistics Analysis and Health Risk Assessment of Water Supply Quality for Human Use in Central Mexico”, *Water, MDPI* (2021). “Health risk assessment in children by PM10 inhalation in Guadalajara metropolitan area over 2011–2018”, *Humand and Ecological Risk Assessment, Taylor y Francis* (2021).

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3849-7107>

GOOGLE SCHOLAR: <https://scholar.google.com/citations?user=wtisEjYAAAAJ&hl=es>

Aída Lucía Fajardo Montiel

Doctora en Ingeniería y Tecnología por la Universidad de Guadalajara. Maestra en Ingeniería de Proyectos por la misma universidad e Ingeniera Química Administrativa por el ITESO. Sus líneas de investigación están enfocadas en la salud, seguridad y medio ambiente en proyectos con la industria.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6523-7477>

GOOGLE SCHOLAR: <https://scholar.google.com/citations?user=uMpu9xYAAAJ&hl=es&oi=ao>

RESEARCHGATE: <https://www.researchgate.net/profile/Aida-Fajardo-Montiel>

Samuel Horacio Cantú Munguía

Maestro en Ingeniería de Proyectos por la Universidad de Guadalajara e Ingeniero Mecánico Eléctrico por la misma Universidad. Tiene 30 años de experiencia en la iniciativa privada, en el sector hidráulico, en la realización, construcción y supervisión de proyectos de agua potable, alcantarillado sanitario, tratamiento y potabilización de agua, alcantarillado pluvial y protección a centros de población por fenómenos hidrometeorológicos.

Lourdes Graciela Cabrera Chavarría

Ingeniera Química con Maestría en Análisis de Sistemas Industriales y Doctora en Agua y Energía por la Universidad de Guadalajara. Cuenta con experiencia en procesos productivos de la industria lechera, así como implementación de siste-

mas de calidad y certificación bajo la norma ISO 9000 en desarrollo de procesos para levaduras, fermentación y optimización de procesos en la industria tequilera. Adicionalmente, como ingeniera de procesos en la industria automotriz, ha participado en transferencias de proyectos optimización y en desarrollo e implementación de nuevas tecnologías a lo largo de su formación, como Green Belt Six Sigma.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5223-0295>

RESEARCHGATE: <https://www.researchgate.net/profile/Lourdes-Cabrera-3>

Mónica Patricia Camas Náfate

Doctora en Agua y Energía y obtuvo la Maestría en Ciencias de la Ingeniería en Agua y Energía por la Universidad de Guadalajara. Es Ingeniera en Energía por la Universidad Politécnica de Chiapas. Es profesora y técnico académico en el Centro Universitario de Tonalá de la Universidad de Guadalajara, donde imparte cursos sobre sistemas de generación y almacenamiento para el aprovechamiento de energías renovables a nivel Licenciatura. Ha desarrollado modelado y diseños de sistemas energéticos en el área de investigación de baterías de ión litio y sistemas termosolares. Coautora dentro del libro *Geotermia y medio ambiente*, editado por Astra Editorial, con los capítulos “La Tierra” (2), “Yacimientos geotérmicos” (4) y “Geotermia en el mundo” (7). Su área de investigación se enfoca en modelado y simulación de sistemas energéticos y de almacenamiento de energía, diseño de sistemas térmicos solares, generalidades de energías renovables, análisis de la pobreza energética y diseño y aplicación de ecotecnologías.

Actualmente colabora con el Laboratorio de Tecnologías Disruptivas del Centro Universitario de Tonalá, Laboratorio en Ciencia de la Ciudad de la Universidad de Guadalajara, en colaboración con el Massachusetts Institute of Technology (MIT Media Lab). Es colaboradora en el Cuerpo Académico UDG-CA-1122 Energías renovables, Ingeniería y Sustentabilidad. Colabora en la Red de Almacenamiento de Energía y Sociedad Mexicana del Hidrógeno (SMH). Su producción académica incluye la formación de recursos humanos a nivel licenciatura y posgrado, publicaciones en revistas internacionales, libros, capítulos de libros, ponencias nacionales e internacionales. Las últimas publicaciones son: (a) Camas-Náfate, M., Coronado-Mendoza, A., Vega-Gómez, C. J., y Espinosa-Moreno, F. (2022), “Modeling and Simulation of a Commercial Lithium-Ion Battery with Charge Cycle Predictions,” *Sustainability*, 14(21), 14035; (b) Camas-Nafate, M. P., Álvarez-Gutiérrez, P., Valenzuela-Mondaca, E., Castillo-Palomera, R., y Pérez-Lu-

na, Y. del C. (2019), "Improved Agricultural Products Drying Through a Novel Double Collector Solar Device," *Sustainability*, 11(10), 2920.

ORCID con <https://orcid.org/0000-0002-8491-3901>

GOOGLE SCHOLAR: <https://scholar.google.es/citations?user=e1J8dvAAAAAJ&hl=es&authuser=1>

RESEARCHGATE: <https://www.researchgate.net/profile/Monica-Camas-2>

Alberto Coronado Mendoza

Realizó sus estudios de Licenciatura en Ingeniería Eléctrica (2000) en el Instituto Tecnológico de Tepic. Cuenta con una Maestría en Ciencias de la Ingeniería Eléctrica, opción Control Automático (2003), en el Cinvestav, unidad Guadalajara. Tiene un Doctorado en Energías Renovables y Eficiencia Energética (2011) en la Universidad de Zaragoza, España. Actualmente es profesor-investigador del Centro Universitario de Tonalá, donde desarrolla líneas de investigación sobre microrredes con energías renovables y eficiencia energética. Imparte clases y dirige tesis en la Licenciatura en Ingeniería en Energía y en las maestrías y doctorado de Agua y Energía. Pertenece al SNII, nivel I. Es responsable del Cuerpo Académico Consolidado de Optimización y Control de Sistemas Energéticos. Su producción académica incluye artículos publicados en revistas internacionales, presentación de ponencias en congresos nacionales e internacionales, impartición de conferencias y talleres sobre eficiencia energética, integración de energías renovables en sistemas híbridos y microrredes tanto para el sector académico como para el industrial. Ha sido responsable técnico de proyectos Conahcyt-SENER, Conahcyt Ciencia básica y Conahcyt-Pronaces. Es responsable del laboratorio de microrredes de energía.

Actualmente es el director del Instituto de Energías Renovables del Centro Universitario de Tonalá. Sus últimas publicaciones son: (a) Coronado-Mendoza, A., Gurubel-Tun, K. J., Zúñiga-Grajeda, V., Domínguez-Navarro, J. A., y Artal-Sevil, J. S. (2018), "Variable Frequency Control of a Photovoltaic Boost Converter System with Power Quality Indexes Based on Dynamic Phasors", *IFAC-PapersOnLine*, 51(13), 180-185; (b) Coronado-Mendoza, A., Pérez-Cisneros, M. A., Domínguez-Navarro, J. A., Osuna-Enciso, V., y Zúñiga-Grajeda, V., Gurubel-Tun, K. J. (2016), "Dynamic phasors modeling for a single phase two stage inverter", *Electric Power Systems Research*, 140, 854-865; (c) Coronado-Mendoza, A., Domínguez-Navarro, J. A. (2014), "Dynamic phasors modeling of inverter fed induction generator",

Electric Power Systems Research, 107, 68-76.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6283-4911>

GOOGLE SCHOLAR: <https://scholar.google.com.mx/citations?user=6Mxc6DAAAAAJ&hl=es>

RESEARCHGATE: <https://www.researchgate.net/profile/Alberto-Coronado/research>

Mayra Eugenia Gamboa González

Doctora en Ciudad, Territorio y Sustentabilidad por la Universidad de Guadalajara, México. Obtuvo la Maestría en Planeación Urbana por la Universidad de California, Los Ángeles. Es profesora e investigadora en el Centro Universitario de Arte, Arquitectura y Diseño (CUAAD) de la Universidad de Guadalajara, donde imparte cursos sobre diseño y planeación urbana y procesos de construcción y gestión de la ciudad a nivel licenciatura y maestría. Ha trabajado en la Dirección de Desarrollo Urbano de la Sedesol en programas para la reducción de la pobreza y en la Secretaría de Desarrollo Urbano y Vivienda del Gobierno del Distrito Federal (ahora Ciudad de México) en el diseño de instrumentos para el desarrollo urbano. Ha sido consultora de la oficina de la ONU-Hábitat en México y es coautora de la *Guía de diseño de espacio público, seguro, incluyente y sustentable*, coeditado por la Sedesol y ONU-Hábitat, y coautora del capítulo “The Barefoot Urbanist, Planning for Unplanned Growth in Latin America and México”, publicado por Rafael Viñoly Architects. Su área de investigación se enfoca en el crecimiento informal y la desigualdad urbana, el desarrollo comunitario, el diseño del espacio público y la movilidad cotidiana.

Actualmente dirige la iniciativa del Laboratorio en Ciencia de la Ciudad de la Universidad de Guadalajara en colaboración con el Massachusetts Institute of Technology (MIT Media Lab). Es miembro del Cuerpo Académico 221 Estudios Urbanos en la línea de investigación Problemáticas Actuales del Desarrollo Urbano. Es investigadora asociada del Instituto de Investigación y Estudios de las Ciudades (IN-Ciudades). Miembro y coordinadora del Laboratorio en Ciencia de la Ciudad de la Universidad de Guadalajara. Participa en el proyecto de Investigación Pronaces “Generación distribuida inteligente, una nueva cultura energética incluyente para el Área Metropolitana de Guadalajara”, con fondos del Conahcyt. También participa en el proyecto de Gestión Integral de Residuos en el Área Metropolitana de Guadalajara, Arup e Imeplan (2015). Sus últimas publicaciones son:

(a) Gamboa González, M., y Demerutis Arenas, J. A. (2020). “Big Data e Análise Urbana: Ciência da cidade nas economias em desenvolvimento” (versión en inglés: “Big Data and Urban Analytics: City Science in Developing Economies”). *Revista De Morfologia Urbana*, 8(1); (b) Nápoles, D., Castillo, A., Gamboa, M., y González, E. (2020). “La colonia Lafayette en Guadalajara México: Entre la gentrificación y la verticalización a partir de los cambios de uso de suelo”, en Livier, V., Nápoles, D., y Escamilla, L. (coords.). *Segregación y fragmentación socioespacial en ciudades. Nuevas formas de habitar la ciudad*. Guadalajara: Centro Universitario de Arte, Arquitectura y Diseño, Universidad de Guadalajara, 199-212; (c) Gamboa, M., Franco, D., y Castillo, A. (2019). “Panorama normativo del espacio público en la metrópoli en México”, en Rodríguez, R., y Becerra, O. (coord.) *Los nuevos desafíos metropolitanos*. Guadalajara: Universidad de Guadalajara, 109-131.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1260-0241>

ACADEMIA: <https://independent.academia.edu/MayraEugeniaGamboaGonzález>

Carlos Jesahel Vega Gómez

Realizó sus estudios de Ingeniería en Comunicaciones y Electrónica en el Centro Universitario de Ciencias Exactas e Ingenierías de la Universidad de Guadalajara. Cuenta con Maestría en Educación con intervención en Práctica Educativa por la Secretaría de Educación Jalisco y es Doctor en Agua y Energía por el Centro Universitario de Tonalá. Ha recibido cursos de actualización por el Massachusetts Institute of Technology (MIT), Harvard Health, Babson College y Queensland University. Actualmente es profesor-investigador del Centro Universitario de Tlajomulco y miembro de las juntas académicas del Doctorado en Agua y Energía y la Maestría en Ciencia de la Ciudad. Es candidato al SNI y pertenece al Cuerpo Académico UDG-CA-1122 Energías Renovables, Ingeniería y Sustentabilidad. Su producción académica incluye la formación de cursos humanos a nivel licenciatura y posgrado, publicaciones en revistas internacionales, libros, capítulos de libros, ponencias nacionales e internacionales.

Actualmente es director de la División de Desarrollo Tecnológico e Ingenierías del Centro Universitario de Tlajomulco y vicepresidente de Instituto de Ingenieros Eléctricos y Electrónicos (IEEE), sección Guadalajara. Sus últimas publicaciones son: (a) Valdivia-Bautista, S. M., Domínguez-Navarro, J. A., Pérez-Cisneros, M., Vega-Gómez, C. J., y Castillo-Téllez, B. (2023). “Artificial intelligence in wind

speed forecasting: A Review”, *Energies*, 16(5), 2457; (b) Marzoug, R., Lakouari, N., Pérez Cruz, J. R., Vega Gómez, C. J. (2022), “Cellular automata model for analysis and optimization of traffic emission at signalized intersection”, *Sustainability* 14(21), 14048; (c) Chan-González, J. de J., Castillo Téllez, M., Castillo-Téllez, B., Lezama-Zárraga, F. R., Mejía-Pérez, G. A., Vega-Gómez, C. J. (2021). “Improvements and Evaluation on bitter orange leaves (*Citrus aurantium L.*) solar drying in humid climates”. *Sustainability*, 13(16), 9393.

ORCID: <https://orcid.org/https://orcid.org/0000-0003-2561-7763>

GOOGLE SCHOLAR: https://scholar.google.es/citations?view_op=list_works&hl=es&hl=es&user=e75DF0MAAAAJ

RESEARCHGATE: <https://www.researchgate.net/profile/Carlos-Jesahel-Vega-Gomez>

Luz Marcela Fernández Briseño

Abogada por la Universidad de Guadalajara y Maestra en Políticas Públicas en Medio Ambiente por la misma universidad, donde actualmente cursa el Doctorado en Derechos Humanos. Desde 2015 es profesora en el Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Monterrey, Campus Guadalajara, en donde imparte diversas materias para la Licenciatura en Derecho. También ha sido instructora ambiental en Coparmex Jalisco. De 2002 a 2005 trabajó como abogada ambiental especialista y coordinadora de Procedimientos Administrativos en la Procuraduría Federal de Protección al Ambiente. De 2007 a 2018 estuvo a cargo de las Direcciones de Regulación y de Evaluación del Impacto Ambiental, de Gestión Integral de Residuos, así como de Sustentabilidad del Sector Productivo, en la Secretaría de Medio Ambiente y Desarrollo Territorial del Gobierno del Estado de Jalisco.

Ha desarrollado proyectos ambientales para el Gobierno del Estado de Jalisco, así como para ONG y agencias internacionales. Ha sido a su vez ponente en diversos foros académicos nacionales e internacionales, incluyendo la Casa de la Cultura Jurídica de la Suprema Corte de Justicia de la Nación.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6085-9699>

Eduardo Parra Ramos

Maestro en Ciencias e Ingeniería del Agua por el Instituto para la Educación del Agua Unesco-IHE con sede en Delft, Países Bajos. Licenciado en Ingeniería Quí-

mica en el ITESO, donde obtuvo mención honorífica en el concurso anual correspondiente de Tesis de la Cámara de Comercio de Guadalajara. Cuenta con una certificación en habilidades de administración de proyectos basado en estándares del PMI e IPMA por el Tecnológico de Monterrey. Desde 2007 ha obtenido experiencia como consultor ambiental, principalmente en proyectos de gestión de residuos, caracterización de sitios contaminados, calidad de agua e impacto ambiental de grandes proyectos hidráulicos; también en la gestión ambiental pública, desempeñando cargos en instituciones como Semarnat, Conagua y la Secretaría de Medio Ambiente del Estado de Jalisco. Asimismo, ha sido docente en Tratamiento de Aguas Residuales y supervisor de proyectos de aplicación profesional relacionados con el aprovechamiento de lodos y biosólidos en el ITESO, y ha participado en el Diplomado de Procesos de Cumplimiento Ambiental Voluntario en el CUCEA, impartiendo el módulo de agua.

ORCID: <https://orcid.org/0009-0000-4891-1872>

Daniel Isaac Jiménez Sánchez

Cursa su último año en el programa de doctorado en Ciudad, Territorio y Sustentabilidad de la Universidad de Guadalajara. Además, tiene el grado de Maestro en Movilidad Urbana, Transporte y Territorio e Ingeniero en Energía por la Universidad de Guadalajara. Sus líneas de investigación se centran en temas de movilidad urbana sustentable, desarrollo urbano sustentable y metabolismo urbano. Ha participado en estancias de investigación internacional y como ponente en conferencias nacionales e internacionales sobre temas de movilidad y desarrollo urbano sustentable.

ORCID: <https://orcid.org/0009-0004-7651-4312>

Alejandro Garza Galicia

Doctor en Agua y Energía por el Centro Universitario de Tonalá de la Universidad de Guadalajara. Su experiencia profesional abarca distintas ramas de la ingeniería para diferentes empresas nacionales y transnacionales. Ha sido catedrático en la línea de termociencias, ingeniería de procesos y ambiental en diferentes instituciones. Actualmente es docente investigador en la Universidad del Valle de Atemajac-campus Guadalajara, en la que está al frente de proyectos de investigación y aplicación con fuentes renovables de energía e ingeniería ambiental. Tiene diferentes publicaciones en revistas arbitradas y de difusión.

ORCID: 0000-0003-0404-4986

GOOGLE SCHOLAR: https://scholar.google.es/scholar?hl=es&as_sdt=0%2C5&q=Alejandro+garza+galicia&btnG=

RESEARCHGATE: <https://www.researchgate.net/profile/Alejandro-Garza>

Rachid Marzoug

Maestro en Instrumentación y Telecomunicaciones por la Facultad de Ciencias de Agadir, Marruecos en 2011. Obtuvo su Doctorado en Física Computacional en la Facultad de Ciencias de la Universidad Mohammed V de Marruecos en diciembre de 2015. En 2018 trabajó como posdoctorado en la Universidad Autónoma del Estado de Morelos, México. En 2019 se integró al SNI, nivel I. Actualmente es profesor de tiempo completo en el Centro Universitario del Norte de la Universidad de Guadalajara, México. Su investigación se centra en el modelado y la simulación de sistemas complejos, sistemas de transporte, autómatas celulares, física estadística y energías renovables.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6578-696X>

GOOGLE SCHOLAR: <https://scholar.google.com/citations?user=j0GDzEcAAA&hl=fr>

RESEARCHGATE: https://www.researchgate.net/profile/Rachid-Marzoug?ev=hdr_xprf

Beatriz Castillo Téllez

Ingeniera Industrial por el Instituto Tecnológico de Zacatepec. Realizó su maestría y doctorado en la Universidad Nacional Autónoma de México con especialidad en Gestión Integral del Agua y Energías Renovables. Actualmente es profesora investigadora en el Centro Universitario del Norte de la Universidad de Guadalajara en México. Pertenecer al SNI y colabora con diversos centros de investigación en el país. Ha impartido clases en diversas Universidades en México; ha dirigido tesis en varios niveles y publicado diversos artículos científicos y libros sobre temas que involucran el binomio agua/energía. Sus líneas de investigación están encaminadas a la solución de problemas de contaminación, salud y pobreza mediante el uso de la energía solar y la gestión integrada el agua. El trabajo primordial de la doctora Castillo actualmente se centra en la desalación de agua de mar por congelación, utilizando energías renovables.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3747-6320>

GOOGLE SCHOLAR: <https://scholar.google.cl/citations?user=rVdV-TwAAAA-J&hl=es>

RESEARCHGATE: <https://www.researchgate.net/profile/Beatriz-Castillo-Tellez>

Jesús Águila León

Académico y profesional altamente calificado en el campo de la ingeniería y la energía, con un enfoque particular en sistemas energéticos renovables y automatización. Cuenta con dos doctorados y una amplia experiencia en investigación y docencia. Actualmente se desempeña como coordinador de Posgrado en Geología en el Centro Universitario de Tonalá de la Universidad de Guadalajara, donde supervisa programas de maestría y doctorado. Además, es profesor investigador en la Universidad de Guadalajara, con distinción de nivel I en el SNI de México. Su trayectoria profesional abarca funciones en programación de PLC, diseño de sistemas de automatización y proyectos de ingeniería en empresas como Hi-Vision e INITEM. Ha trabajado en proyectos de investigación financiados por la Generalitat Valenciana en España y el Consejo Nacional de Humanidades, Ciencias y Tecnologías (Conahcyt) de México, centrados en la optimización de microrredes híbridas renovables y sistemas de energía solar para mitigar la pérdida de productos agrícolas.

Ha contribuido significativamente al cuerpo de conocimiento en su campo con numerosas publicaciones en revistas académicas y presentaciones en conferencias internacionales. Sus trabajos se centran en temas como la optimización de sistemas energéticos mediante algoritmos bioinspirados, controladores de seguimiento de punto de máxima potencia y gestión de energía en microrredes híbridas. Es miembro de varias organizaciones profesionales, incluido el Instituto Universitario de Ingeniería Energética de la Universitat Politècnica de València y la Power and Energy Society del IEEE. Con una carrera que abarca tanto la academia como la industria, ha mostrado estar comprometido con el avance de soluciones sostenibles y eficientes en el ámbito energético.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0538-0842>

GOOGLE ACADÉMICO: <https://scholar.google.es/citations?user=rF9BM2gAAAJ&hl=es&oi=ao>

RESEARCHGATE: <https://www.researchgate.net/profile/Jesus-Aguila-Leon>

Gerardo Alberto Mejía Pérez

Egresado del Centro Universitario de Ciencias Exactas e Ingenierías de la Universidad de Guadalajara, donde ha cultivado una destacada carrera en el ámbito académico y administrativo. Posee un título de Ingeniero Mecánico Eléctrico y ha obtenido el grado de Maestro en Análisis de Sistemas Industriales. Actualmente se encuentra en el segundo año de su Doctorado en Inclusión, Políticas Públicas e Investigación. Su compromiso con la universidad se evidencia a lo largo de 28 años de servicio: inició en 1995 como profesor y escaló posiciones significativas. Durante su trayectoria ha ocupado puestos de liderazgo y gestión. Ha sido director de educación técnica, director de la escuela vocacional, secretario administrativo de un centro universitario y rector del Centro Universitario del Norte. Además, ha desempeñado un papel clave en la extensión y acción social, contribuyendo al fortalecimiento de la conexión universidad-comunidad. Su labor no se limita al ámbito académico, pues ha trabajado en cargos externos. Ha sido jefe operativo en la Dirección de Alumbrado Público del Ayuntamiento de Guadalajara y jefe de producción en una empresa privada. Además, es miembro del Colegio de Ingenieros Mecánicos Electricistas del Estado de Jalisco desde 1994.

Destacado en el campo de la investigación, ha publicado artículos en revistas nacionales e internacionales y ha contribuido a la literatura con un libro. Su experiencia abarca diversas áreas, incluyendo energías renovables, ciencia, tecnología y educación. También ha presentado sus investigaciones en conferencias y seminarios a nivel internacional. Es reconocido por su compromiso con la igualdad y la inclusión, pues ha participado en programas y talleres relacionados con género, discapacidad y responsabilidad social. Ha participado en la organización de eventos académicos y culturales, así como en iniciativas de movilidad internacional y proyectos de sustentabilidad. En reconocimiento a su destacada labor, ha recibido múltiples honores y premios, incluido el Reconocimiento a la Gestión Institucional por la Universidad de Guadalajara. Su contribución en el ámbito educativo también se refleja en su papel como padrino de generación en varias ocasiones y su participación en consejos y comités universitarios.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1701-1171>

Margarita Castillo Téllez

Investigadora nacional nivel I del SNII con perfil deseable del PRODEP y beca al desempeño académico nivel VIII. Es de formación Ingeniera Industrial en Pro-

ducción, con una Maestría en Ingeniería en Gestión Integrada del Agua, y Doctorado en Ingeniería con orientación en Energías Renovables y especialización en Energía Solar. Ha impartido clases y dirigido tesis a nivel licenciatura, maestría y doctorado. Ha sido ponente en encuentros académicos científicos nacionales e internacionales y publicado artículos de circulación nacional e internacional en revistas indexadas y de alto impacto, además de libros de texto para nivel licenciatura, junto con libros y capítulos de libro relacionados con la ingeniería industrial y tecnologías energéticas renovables. Cuenta con acreditaciones de auditor para los sistemas de gestión en las normas ISO 90001 de calidad en el servicio, 14001 de gestión ambiental, 45001 de gestión de la seguridad y salud y 50001 de gestión de la energía. Es responsable del Programa Institucional de Uso Eficiente de Agua y Manejo de Aguas Residuales de la Coordinación General de Sustentabilidad de la Universidad Autónoma de Campeche. Es coordinadora de la Maestría en Energía con orientación en Energía de la UAC y líder del Cuerpo Académico Consolidado CA-UNACAM-57 Sustentabilidad Energética.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9639-1736>

GOOGLE SCHOLAR: <https://scholar.google.com/citations?user=fBck5q8AAA&hl=es>

RESEARCHGATE: <https://www.researchgate.net/profile/Castillo-Tellez>

Néstor Ortiz Rodríguez

Ingeniero Químico Industrial por la Facultad de Ingeniería Química de la Universidad Autónoma de Yucatán, con especialidad en Estadística por la Facultad de Matemáticas de la Universidad Autónoma de Yucatán. Cuenta con un Diplomado en Gestión Estratégica de Proyectos de Innovación por el Consejo de Ciencia, Innovación y Tecnológica del Estado de Yucatán. En su trayectoria académica y profesional ha participado y dirigido proyectos de investigación y productivos para instituciones como el Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología, la Comisión Nacional Forestal y Fundación Produce Yucatán. Se ha desempeñado como consultor de procesos productivos en la incubadora de empresas de la Universidad Tecnológica Metropolitana. También ha impartido clases en las áreas de ingeniería y ciencias exactas en la Universidad Abierta y a Distancia de México.

Ha ganado múltiples premios: primer lugar junto con su equipo de trabajo en la Edición 2015-2016 de Ingenio Emprendedor organizado por Alianza FIDEM; primer lugar en el Certamen de Propuestas Multidisciplinarias para Resolver

Asuntos Apremiantes de la Realidad Mexicana “Javier Barros Sierra”. México, 2015. Además, es miembro en el programa de Jóvenes en la Academia de Ingeniería de México (2017-2020), colaborando en el programa multidisciplinario de Competitividad e Innovación.

Actualmente estudia el Doctorado en Ingeniería en Energía en el Instituto de Energías Renovables de la UNAM y es corresponsable técnico del proyecto número 319 195 del Conahcyt, 2021-2024. La línea de investigación que trabaja es las energías renovables, específicamente la solar-térmica y biomasa, usando como herramienta la dinámica de fluidos computacionales. Es impulsor y partícipe de proyectos de emprendurismo enfocados a las TIC y a la sustentabilidad. Apasionado en la búsqueda de soluciones innovadores y las aplicaciones tecnológicas.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2202-6776>

RESEARCHGATE: <https://www.researchgate.net/scientific-contributions/Nestor-Ortiz-Rodriguez-2175169985>

Ángel Oswaldo Gama Camacho

Actualmente es estudiante de la Maestría en Ciencias e Ingeniería del Agua y la Energía del Centro Universitario de Tonalá. Obtuvo el grado universitario como Licenciado en Física por el Centro Universitario de Ciencias Exactas e Ingenierías de la Universidad de Guadalajara. Se encuentra desarrollando el proyecto de tesis de posgrado titulada *Simulación en tiempo real de una microrred híbrida*.

Kelly Joel Gurubel Tun

Doctor en Ciencias por el Centro de Investigación y de Estudios Avanzados (Cinvestav). Maestro en Ciencias por el Cinvestav. Licenciado en Ingeniería Química por el Instituto Tecnológico de Mérida. Se ha desempeñado como investigador en el Departamento de Estudios de Agua y la Energía en el Centro Universitario de Tonalá de la Universidad de Guadalajara. Es miembro activo del SNI, nivel I y participa en los posgrados, Ingeniería del Agua y la Energía de la Universidad de Guadalajara, donde forma parte del cuerpo académico de optimización y control de sistemas. Autor de más de 20 artículos y capítulos de libro publicados en revistas científicas internacionales. Cuenta experiencia de ocho años como líder de laboratorio de metrología en el área de manufactura de componentes automotrices. Es líder y colaborador de proyectos de ciencia básica financiados por el

Conahcyt. Líneas de investigación: control automático, redes neuronales artificiales y ciencia de datos y sus aplicaciones en sistemas energéticos.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9999-9018>

GOOGLE ACADÉMICO: https://scholar.google.com/citations?view_op=list_works&hl=es&hl=es&user=TS-C408AAAAJ

RESEARCHGATE: <https://www.researchgate.net/profile/Joel-Gurubel>

Natalia Naval Martín

Doctora en Energías Renovables y Eficiencia Energética por la Universidad de Zaragoza (España) y obtuvo el grado de Licenciada en Ingeniería Industrial en el mismo centro universitario, donde se ha desempeñado como profesora investigadora en el área de Ingeniería Eléctrica de la Escuela de Ingeniería y Arquitectura. Ha publicado diversos artículos de investigación en revistas de arbitraje, principalmente en las áreas de despacho óptimo de agua y energía en microrredes de generación, como “Virtual power plant models and electricity markets-A review”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* (2021); “Optimal short-term water-energy dispatch for pumping stations with grid-connected photovoltaic self-generation”, *Journal of Cleaner Production* (2021), y “A virtual power plant optimal dispatch model with large and small-scale distributed renewable generation”, *Renewable Energy* (2020).

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1968-6300>

Jorge Arnoldo Villegas Espinoza

Doctor en Ciencias Agropecuarias por la Universidad Autónoma de Baja California Sur.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6551-8028>

CORREO: jvillegas@uabcs.mx

Agua y energía: actualidad y retos para un desarrollo sostenible, de Alberto Coronado Mendoza y Kelly Joel Gurubel Tun (coordinadores), publicado por Ediciones Comunicación Científica, S. A. de C. V., se publicó en mayo de 2024, en versión digital para acceso abierto en los formatos PDF, EPUB y HTML5.

El agua y la energía son dos bienes esenciales para el desarrollo armónico de la sociedad y el sustento de la vida, por lo que la División de Ingenierías e Innovación Tecnológica, el Instituto de Energías Renovables y el Departamento de Estudios de Agua y la Energía del Centro Universitario de Tonalá de la Universidad de Guadalajara han organizado el Seminario de Agua, Energía y Medio Ambiente por una Cultura de Paz.

El seminario se desarrolla anualmente. En éste se diseña una jornada de trabajo invitando a actores de los diferentes sectores académico, social, gubernamental e industrial en las áreas de agua, energía y medio ambiente. Tiene como objetivo principal identificar, proponer, crear y difundir propuestas de solución a las problemáticas relacionadas con los impactos ambientales y la influencia que tienen en los conflictos sociales por la degradación del medio ambiente.

El libro comprende 11 capítulos, de los cuales 4 están relacionados con la temática del agua y 7 con el área de la energía. Los autores de los diferentes capítulos son profesores-investigadores de diferentes Centros Universitarios de la Universidad de Guadalajara, así como de otras universidades nacionales y extranjeras y del sector industrial, lo cual fortalece y enriquece esta obra que busca acercar el conocimiento de estos temas tan relevantes a la sociedad, en un lenguaje comprensivo que invite al lector a reflexionar sobre la problemática actual en agua y energía, la cual es necesario resolver de manera participativa para conservar la paz y el desarrollo sostenible de nuestras comunidades.



Alberto Coronado Mendoza es Doctor en Energías Renovables y Eficiencia Energética por la Universidad de Zaragoza, España. Investigador de la Universidad de Guadalajara y miembro del SNII, nivel I. Su LGAC es micro-redes de energía. Es el Director del Instituto de Energías Renovables del CU Tonalá.



Kelly Joel Gurubel Tun es Doctor en Ciencias por el Cinvestav-IPN México. Investigador de tiempo completo en el Departamento de Estudios del Agua y la Energía de la Universidad de Guadalajara. Sus líneas de investigación son control automático, redes neuronales artificiales y sistemas energéticos.



Dimensions



Google Scholar



[DOI.ORG/10.52501/CC.178](https://doi.org/10.52501/CC.178)



**COMUNICACIÓN
CIENTÍFICA** PUBLICACIONES
ARBITRADAS

HUMANIDADES, SOCIALES Y CIENCIAS

www.comunicacion-cientifica.com



9 786079 104276