

Sostenibilidad, sustentabilidad y medioambiente

Nuevas tendencias



Universidad
Autónoma
de Nayarit



Mario Guadalupe González Pérez
Fernando Flores Vilchez
Jesús Águila León
Edith Xio Mara García García
Coordinadores

Sostenibilidad, sustentabilidad y medioambiente

Nuevas tendencias



Universidad
Autónoma
de Nayarit



Editorial
UAN



astra
editorial

Comité Editorial

Dr. Yefer Aprilla Lara
Dr. Arturo Estrada Vargas
Dra. Sylvia Lorena Serafín González
Dr. Edgar Gustavo Rivas Inda
Mtro. Mauricio Camarena González

Comité Científico

Dra. Esmeralda Brito Cervantes
Universidad Autónoma de Guadalajara, México.

Dr. Gibrán Humberto Manjarréz Pérez
Universidad Autónoma de Sinaloa, México.

Dr. Jorge Arturo Pineda
Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Colombia.

Dr. José Andelfo Lizcano Caro
Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Colombia.

Dr. Cesar Augusto García Ubaque
Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Colombia.

Dr. Edgar Ulises Estrada Meza
**Colegio de Profesionistas de la Movilidad Urbana del Estado de Jalisco,
México.**

Dr. Edgar Orlando Ladino Moreno
Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Colombia.

Mtro. Marco Tulio Espinoza
Universidad de Ciencias Aplicadas y Ambientales, Colombia.

Sostenibilidad, sustentabilidad y medioambiente

Nuevas tendencias

Mario Guadalupe González Pérez
Fernando Flores Vilchez
Jesús Águila León
Edith Xio Mara García García
Coordinadores



Universidad
Autónoma
de Nayarit



astra
editorial

Sostenibilidad, sustentabilidad y medioambiente. Nuevas tendencias. **Autores-coordinadores:** Mario Guadalupe González Pérez; Fernando Flores Vilchez; Jesús Águila León; Edith Xio Mara García García.— Tepic, Nayarit. México. 2024

Universidad Autónoma de Nayarit.

Dra. Norma Liliana Galván Meza

Rectora

Mtra. Margarete Moeller Porraz

Secretaria general

Lic. Ana Cristina Álvarez Castañeda

Directora de Fomento Editorial y Artes Gráficas

Primera edición

ISBN: **978-607-8863-69-3**

Universidad Autónoma de Nayarit

Formato Digital: Descarga y *online*

ISBN: **978-607-8964-17-8**

Astra Ediciones

Formato Digital: Descarga y *online*

DOI: <https://doi.org/10.61728/AE24004237>



© D. R. 2024. Mario Guadalupe González Pérez; Fernando Flores Vilchez; Jesús Águila León; Edith Xio Mara García-García; Karina Guadalupe Pinedo García; Luís Enrique Barboza-Niño Mirna Aideé Avilés Mis; Joshua Camarena Guzmán; Jesús Cabrera Chavarría; Oyoltzi Nájera González; Nereyda Madai Beltrán Bojórquez; Susana María Lorena Marcelleño Flores; Areli Nájera González; Juan Manuel Sandoval-Hernández; Abril Adriana Angulo Sherman; Blanca Rocio Serafin García, Espicio Monteros Curiel; Tania Villaseñor Vargas; Aída Alejandra Guerrero-de León; Aída Lucía Fajardo Montiel; Hermes Ulises Ramírez Sánchez; Héctor Hugo Ulloa Godínez; Mario Enrique García Guadalupe; Jaime Alcalá Gutiérrez; Rubén Sánchez Gómez; Carlos Vargas Salgado; Nestor Manuel Ortiz Rodríguez; David Alfonso Solar.

Universidad Autónoma de Nayarit/Ciudad de la Cultura Amado Nervo S/N. Tepic, Nayarit. México. C.P. 63000. Dirección de Fomento Editorial y Artes Gráficas Tel. 311 211 8800, ext. 8718 / 8838, www.uan.edu.mx

Esta es una obra arbitrada por pares académicos y se privilegia con el aval de la institución editora. Universidad Autónoma de Nayarit

Edición y corrección: **Astra Ediciones**

Diseño de portada: Josué Francisco Acosta Cerecer

HECHO EN MÉXICO / MADE IN MEXICO

Contenido

Introducción	9
Eje 1	
Planificación y gestión.....	17
Capítulo 1.1	
Percepción de la peligrosidad geológica en el municipio de Tonalá, Jalisco: hacia una planificación y gestión urbana sostenible.	19
<i>Karina Guadalupe Pinedo García</i>	
<i>Mario Guadalupe González Pérez</i>	
Capítulo 1.2	
Capacidad de carga turística en playa Novillero, Nayarit, México.....	47
<i>Oyolsi Nájera González</i>	
<i>Nereyda Madai Beltrán Bojórquez</i>	
<i>Susana María Lorena Marcelaño Flores</i>	
<i>Areli Nájera González</i>	
Capítulo 1.3	
Sostenibilidad y riesgos de contaminación en cuerpos de agua: el caso de las extracciones clandestinas de hidrocarburos en Tala, Jalisco.....	69
<i>Juan Manuel Sandoval-Hernández</i>	
<i>Christian René Escudero Ayala</i>	
<i>Edith Xio Mara García-García</i>	
Capítulo 1.4	
Gestión, sustentabilidad y ecohidrología del Río Santiago.....	107
<i>Tania Villaseñor Vargas</i>	
<i>Aida Alejandra Guerrero-de León</i>	
Eje 2	
Nuevas tendencias.....	133

Capítulo 2.1

Sustentabilidad agroalimentaria: preservación Isocórica y el trinomio agua-energía-alimentos135

Abril Adriana Angulo Sherman

Blanca Rocio Serafín García

Espicio Monteros Curiel

Capítulo 2.2

Estrategias corporativas para la reducción de gases de efecto invernadero: sostenibilidad y calidad del aire.....155

Aída Lucía Fajardo Montiel

Hermes Ulises Ramírez Sánchez

Héctor Hugo Ulloa Godínez

Mario Enrique García Guadalupe

Jaime Alcalá Gutiérrez

Rubén Sánchez Gómez

Capítulo 2.3

Potenciando la sostenibilidad industrial mediante sistemas de energía solar térmica.....177

Jesús Águila León

Néstor Manuel Ortiz Rodríguez

Carlos Vargas Salgado

David Alfonso Solar

Capítulo 2.4

Innovación y sostenibilidad: soluciones basadas en la naturaleza para el desarrollo urbano del Área Metropolitana de Guadalajara.....211

Luis Enrique Barboza Niño

Mirna Aideé Avilés Mis

Joshua Camarena Guzmán

José De Jesús Cabrera Chavarría

Capítulo 2.5

Degradación de suelos en Colombia y soluciones de bioingeniería: perspectivas transversales de recuperación a largo plazo.....225

Juan Camilo Pineda Herrera

Jorge Arturo Pineda Jaimés

Sherley Catheryne Larrañaga-Rubio

Introducción

El medioambiente conceptualizado como un sistema natural ha estado presionado por fuerzas antrópicas que en las últimas décadas se han convertido en fuerzas entrópicas, pues transforman y modifican muchas veces de forma irreversible la morfología de las condiciones originarias de los subsistemas naturales. En otros términos, estas fuerzas cambian la forma e incrementan la incertidumbre en torno a la sustentabilidad y sostenibilidad de los elementos del sistema y del sistema mismo. No obstante, sostenibilidad y sustentabilidad se han caracterizado por ser dos conceptos, cuyos argumentos se concatenan a través de reflexiones teóricas y constataciones empíricas no siempre concordantes al planteamiento hipotético inicial; por tanto, ambos conceptos se han confundido y ha coincidido, discrepado o complementado. De ahí, la conformación paulatina de un cuerpo teórico-metodológico, cuyas premisas datan de la manifestación de eventos del último tercio del siglo pasado, pero que en la actualidad convergen en un común denominador: el futuro del ecosistema en general y sus subsistemas en lo particular; es decir, el futuro de la vida misma.

En este contexto, conceptos como planificación, gestión, innovación, capacidad de carga, peligro, riesgo, preservación, calidad, entre otros, toman relevancia dentro de un marco referencial sobre escenarios previos, actuales y posteriores al proceso antrópico de habitar el territorio. Dado que, las actividades humanas se circunscriben dentro de una de las principales causas de intervención y modificación de forma y contenido de los sistemas bióticos y abióticos. Estas modificaciones han impactado directamente en el suelo, el agua y el aire, afectando y comprometiendo la calidad y permanencia de las condiciones óptimas para que ocurra la vida. Asimismo, dentro del primer elemento (agua), hemos podido constatar como escurrimientos y depósitos naturales y artificiales superficiales y subterráneos han sido afectados por vertidos contaminantes resultado del proceso de producción que no solo dañan la flora y fauna nativas en estos cuerpos

de agua, sino a las especies dependientes de este líquido incluida la propia especie humana causal del impacto.

Por otro lado, en lo concerniente al suelo, los propios vertidos afectan la fertilidad de los mismos y comprometen la seguridad alimentaria y la urbanización modifica las condiciones originarias del suelo y de los ciclos naturales del escurrimiento y la infiltración. Esta alteración termina por otorgar incertidumbre a las nuevas manifestaciones antrópicas en esos suelos modificados, cuyas soluciones no suelen considerar las restricciones de la naturaleza.

En materia de energía, el escenario no ha sido muy alentador, dado que, el tema de las emisiones de gases de efecto invernadero a la atmósfera es algo que no ha sido solventado. Sectores como el industrial y automotriz poco han realizado para la minimización de esta entropía pues consumen altas cantidades de energía. De igual forma, la construcción habitacional principalmente horizontal, continúa en diversas ciudades de México realizando modificaciones en los usos del suelo, y con ello, reduciendo el número áreas verdes que no solo contrarrestan los efectos adversos del cambio climático y fungen como pulmones urbanos o periurbanos sino que albergan cantidades significativas de fauna y flora nativas. De esta manera, el reto en materia energética implica un cambio de paradigma sobre los modos de consumo y sobre todo, la disminución de los excedentes energéticos causales de entropía.

Con base en lo anterior, *Sostenibilidad, sustentabilidad y medioambiente. Nuevas tendencias*, es una obra que articula nueve investigaciones preocupadas por la gestión y planificación de la materia y energía, donde suelo, agua, y aire, son analizados bajo diferentes enfoques multidisciplinares, los cuales pasaron por diferentes fases: a) problematización, conceptualización y argumentación, instrumentación de los pasos a seguir para cumplimentar con los objetivos propuestos, obtención de resultados, discusión y conclusiones preliminares. Sin embargo, es muy probable la existencia de información adicional obtenida en campo que no es sencillo o usual expresarse en los escritos. Ya que, al ser ejercicios científicos suelen omitir la sensación y emoción características del proceso de indagación, análisis y síntesis.

La articulación de trabajos que dio origen a esta obra, es el resultado de un esfuerzo conjunto entre estudiantes de doctorado e investigadores

e investigadoras con adscripción a la Universidad de Guadalajara (UdeG), Universidad Autónoma de Nayarit (UAN), Universidad Politécnica del Estado de Nayarit (UPEN) y Universidad Distrital Francisco José de Caldas de Colombia; los cuales han compartido los resultados de sus respectivos proyectos colaborativos de investigación. En este sentido, es meritorio agradecer las facilidades que la UAN ha realizado para facilitar el proceso de edición, revisión y dictaminación correspondiente para la publicación de este proyecto.

Así, el presente trabajo se ha estructurado en dos ejes: Eje 1. “Planificación gestión” y Eje 2. “Nuevas tendencias”. En el primero de ellos, hace referencia a estudios que abordan al importancia de gestionar de una forma sostenible lo recursos suelo y agua, y en el segundo eje, se presentan las nuevas tendencias en materia de sostenibilidad e innovación para tratar aspectos relacionados con la energía, el aire, la alimentación y el diseño basado en la naturaleza.

En función de lo anterior, dentro del Eje 1: Karina Pinedo-García y Mario Guadalupe González-Pérez en el capítulo 1.1: *Percepción de la peligrosidad geológica en el municipio de Tonalá, Jalisco: hacia una planificación y gestión urbana sostenible*, nos comparten información relevante de diferentes zonas dentro del municipio de Tonalá, que gradualmente se han urbanizado. Concretamente, asentamientos ubicados en laderas o bajo de ellas; por tal motivo, los autores se cuestionan la peligrosidad en estas zonas de riesgo. De tal forma que se avocaron a reunión la percepción de los residentes, con la intención de poder aportar datos que coadyuven a un plan de desarrollo urbano para el municipio y los tomadores de decisiones. En otros términos, es prioritario considerar medidas de prevención y mitigación y reducir en lo posible la vulnerabilidad de la habitabilidad.

En el capítulo 1.2: *Capacidad de Carga en playa Novillero (Nayarit, México): hacia la sostenibilidad de la actividad turística* Oyolsi Nájera-González, Nereyda Madai Beltrán-Bojórquez Susana María Lorena Marcelaño-Flores y Areli Nájera-González nos comparten que el turismo es una de las actividades económicas más importantes de México. Concretamente en lo concerniente al turismo de sol y playa, y cuyos efectos han sido ampliamente estudiados. Según los autores y autoras, algunos estudios han incorporado el concepto de Capacidad de Carga Turística (CCT); es decir, un sistema de indicadores que proporciona información sobre el nivel de uso que

puede admitir un sitio turístico para su conservación a largo plazo. En este sentido, se aborda el caso de Playa Novillero en el Estado de Nayarit, la cual experimenta fuertes presiones del turismo en el periodo vacacional de Semana Santa. De tal manera, que bajo los criterios de esta metodología de evaluación adaptada a las particularidades del lugar encontraron la posibilidad de incrementar a un máximo de 5312 visitantes por día si se consigue tener la capacidad de manejo en niveles óptimos.

En el capítulo 1.3: *Sostenibilidad y riesgos de contaminación en cuerpos de agua: el caso de las extracciones clandestinas de hidrocarburos en Tala, Jalisco*, Juan Manuel Sandoval-Hernández y Edith Xio Mara García-García sostienen que la expansión de los ductos para el transporte de combustibles a nivel nacional prevén hoy en día una adecuada operación, control y mantenimiento de la red, con la intención de evitar la aparición de fugas y derrames que amenacen la sostenibilidad y riesgo de contaminación de cuerpos de agua. Por tal motivo, el monitoreo considera variables de sustentabilidad, rentabilidad, monitoreo tecnológico y software, que permiten obtener información e indicadores en tiempo real. No obstante, en México se ha dado un fenómeno de robo de hidrocarburo por medio de estos ductos, conocida esta actividad como “huachicoleo”; lo que implica la necesidad de inversión en caracterización y remediación ambiental. Lamentablemente, la eficacia jurídica al emprender acciones para reglamentar, castigar y evitar el daño de esta infraestructura es indicador de ineficiencia para sancionar a quienes generen contaminación o degradan el medioambiente a causa de estas tomas clandestinas. De ahí, la urgencia de revalorar el concepto de activo ambiental, para que la contaminación de los cuerpos de agua superficial y subterráneos puedan tener una acción pertinente por parte de la autoridad.

En el capítulo 1.4: *Gestión, sustentabilidad y ecohidrología del Río Santiago*, Tania Villaseñor-Vargas y Aída Alejandra Guerrero de León, analizan la participación social en la gestión y sustentabilidad del agua que ocurre en el río Santiago. En este sentido, las autoras abordan el tema de la ecohidrología, la cual, plantea una nueva metodología para una gestión sustentable del agua con fundamento en evidencia científica que proviene de varios campos interdisciplinarios. De ahí, el agua concebida como un bien limitado, y cuya cantidad en el planeta se encuentra restringida, la disponibilidad no dependería solo de la ubicación o de las condiciones naturales, sino de la capacidad tecnológica. De tal manera que el desarrollo sustentable sería

el adecuado marco teórico-conceptual para la administración de los recursos materiales, económicos, humanos y en especial los recursos naturales, con el objetivo de heredar a las generaciones futuras, una sociedad con oportunidades mejores o iguales a las actuales.

Dentro del Eje 2, Abril Adriana Angulo-Sherman, Blanca Rocío Serafín-García y Espicio Monteros-Curiel nos externalan en el capítulo 2.1: *Sustentabilidad agroalimentaria: preservación Isocórica y el trinomio agua-energía-alimentos*, que las condiciones de almacenamiento isocórico poseen un gran potencial para ser aplicadas en la preservación de tejidos biológicos. Inclusive, en la última década se han reportado una gran variedad de resultados aplicados a la viabilidad en tejidos o cultivos biológicos, lo que ha permitido sugerir condiciones de temperatura que pudieran ser aplicadas a alimentos. En este sentido, se identifican ventajas de este proceso de almacenamiento, como la posibilidad de utilizar equipos comerciales de enfriamiento (refrigeradores) sin necesidad de equipos de alta presurización o refrigeración especializados, además de no tener la necesidad de utilizar anticongelantes o reducir el uso de sustancias nocivas para la salud y la reducción del consumo de energía. Según los autores, se han obtenido resultados favorables en materia de alimentos, y en la ciencia del agua podrían implementarse para mejorar las condiciones de preservación de los alimentos reduciendo el consumo de energía e insumos en comparación con otros procesos que se utilizan actualmente para el mismo propósito.

En el capítulo 2.2: *Estrategias corporativas para la reducción de Gases de Efecto Invernadero: sostenibilidad y calidad del aire*, Aída Lucía Fajardo-Montiel, Hermes Ulises Ramírez-Sánchez, Héctor Hugo Ulloa-Godínez, Mario Enrique García-Guadalupe, Jaime Alcalá-Gutiérrez y Rubén Sánchez-Gómez, hacen énfasis en el aumento de las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) y sus efectos perjudiciales en la salud ambiental, particularmente en poblaciones vulnerables. De tal forma, que destacan la importancia del monitoreo de la calidad del aire, junto con modelos de predicción e inventarios de emisiones, como herramientas cruciales para la gestión ambiental efectiva. Los autores identifican múltiples fuentes de contaminación del aire, tanto naturales como antropogénicas, destacando el papel crítico de la quema de combustibles fósiles en el aumento de las concentraciones de dióxido de carbono (CO₂). La propuesta que presentan sobre el Protocolo de Gases de Efecto Invernadero la convierte en una herramienta

integral, para contabilizar y reportar las emisiones GEI corporativas.

En el capítulo 2.3: *Potenciando la sostenibilidad industrial mediante sistemas de energía solar térmica*, Jesús Águila-León, Nestor Manuel Ortiz Rodríguez, Carlos Vargas-Salgado y David Alfonso-Solar, abordan la importancia de los sistemas de energía solar como medio potenciador de la sostenibilidad industrial en México. Según los autores, la energía solar es una solución viable y sostenible para cubrir parte importante de la demanda energética, especialmente en procesos industriales, donde una importante cantidad de procesos requieren de temperaturas de hasta 250 °C. Por tal motivo, en su trabajo, realizan una descripción del contexto energético nacional, destacando el elevado consumo de energía del sector industrial y su dependencia en combustibles fósiles, como el gas natural. De igual forma, presentan una revisión de la evolución de la generación y consumo de energía en México, explorando el potencial de la energía solar térmica para aplicaciones industriales, describiendo las diversas tecnologías disponibles como lo son colectores solares planos, colectores solares de tubos evacuados, parabólicos compuesto y de canal parabólico.

En el capítulo 2.4: *Innovación y Sostenibilidad: Soluciones Basadas en la Naturaleza para el desarrollo urbano del Área Metropolitana de Guadalajara (AMG)*, Luis Enrique Barboza-Niño, Mirna Aideé Avilés-Mis, Joshua Camarena-Guzmán y Jesús Cabrera-Chavarría, plantean que la expansión urbana y el aumento poblacional presentan retos significativos para la sostenibilidad y calidad de vida en zonas urbanas; de ahí, la posibilidad de incorporar Soluciones Basadas en la Naturaleza (SbN) en el proceso de planificación urbana, ya que, las SbN se destacan por ser estrategias efectivas para integrar el crecimiento habitacional con el entorno natural; es decir, se ha evidenciado que proporcionan beneficios para el humano como para la biodiversidad. Concretamente, en la última década el AMG ha experimentado sequías severas coincidentes con aumentos de temperatura, que aunado a la reducción de áreas verdes han complicado el escenario actual. En este sentido, la incorporación de las SbN pueden ayudar a mitigar la severidad de estos eventos climáticos con fuertes dosis de causales antropogénicas.

Finalmente, en el capítulo 2.5: *Degradación de suelos en Colombia y soluciones de bioingeniería: perspectivas transversales de recuperación a largo plazo* Juan Camilo Pineda Herrera, Jorge Arturo Pineda Jaimes y Sherley Catheryne Larraña-

ga Rubio nos comparten la importancia de recuperar suelos degradados y erosionados, mediante acciones sostenibles y de mitigación con efectos a largo plazo. Según los autores, la bioingeniería y los biomantos podrían ser una alternativa eficaz para tales situaciones *in situ*.

Eje **1**

Planificación y gestión

Capítulo 1.1

Percepción de la peligrosidad geológica en el municipio de Tonalá, Jalisco: hacia una planificación y gestión urbana sostenible.

*Karina Guadalupe Pinedo García¹
Mario Guadalupe González Pérez²*

<https://doi.org/10.61728/AE24004244>



¹ Estudiante del doctorado en Geología adscrito al Departamento de Estudios del Agua y la Energía del Centro Universitario de Tonalá de la Universidad de Guadalajara. *e-mail:* karina.pinedo6707@alumnos.udg.mx

² Profesor investigador del Departamento de Estudios del Agua y la Energía del Centro Universitario de Tonalá de la Universidad de Guadalajara. *e-mail:* mario.gperez@academicos.udg.mx

Introducción

Según el objetivo número 11 del programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo, el rápido aumento en la población en las grandes urbes y zonas de marginación se conviertan en una característica de la urbanización (United Nations Department of Economic and Social Affairs, 2023). El objetivo habla de la mejora a la seguridad y sostenibilidad de las ciudades mediante viviendas seguras y una adecuada planificación y gestión urbana. De aquí, se propuso analizar la peligrosidad residencial en zonas de riesgo en el municipio de Tonalá, con la finalidad de brindar información pertinente para brindar un adecuado plan de desarrollo urbano y, al tomar en cuenta estas consideraciones, se podrá prever el riesgo de ocurrencia de desastres, tomar medidas de prevención y mitigación para así permitir que, al menos en el aspecto de riesgos geológicos “los asentamientos marginales” no sean tan vulnerables y sí resilientes.

El planeta Tierra se encuentra en constante movimiento gracias a las fuerzas geodinámicas que ocurren en su interior. Es debido a ello que se ha formado el hermoso paisaje que se puede observar con sus diferentes tipos de rocas, elevaciones y colores (ver figura 1). A veces las capas suben o bajan, dependiendo del tipo de fuerza que se ejerce sobre ellas, ya sean compresivas, distensivas o de transformación (Tarbuck y Lutgens, 2005).

Figura 1
Paisaje geomorfológico



Fuente: elaboración propia

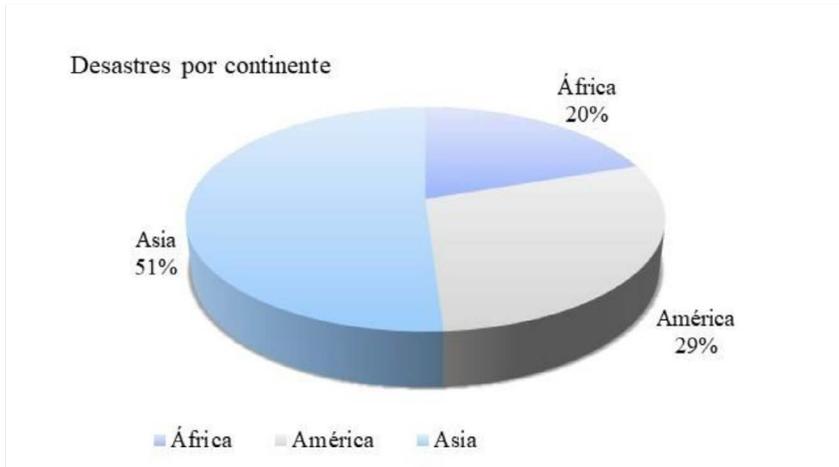
Las fuerzas geodinámicas son las encargadas de provocar esos temidos movimientos que ocasionalmente provocan daños y desastres, tanto en edificaciones como en vías de comunicación, servicios de agua y electricidad; pérdidas económicas y de vidas sobre todo humanas. Sin embargo, un sismo es la liberación de energía del subsuelo (Estrada, 2012), que provoca movimientos en la corteza terrestre; pueden o no activar las fallas geológicas existentes o pueden abrir un nuevo fracturamiento en la superficie. Y es también lo que hace tan característica la topografía de cada región y, que en conjunto nos permite definir cuáles son las zonas más aptas para diferentes actividades, tanto agrícolas, forestales, urbanas, civiles. Por ejemplo, en el caso de construir en una parte baja topográficamente, es de saberse que existe la tendencia a ocurrir inundaciones, más que en una parte alta. En este mismo sentido, si edificas sobre una falla geológica o sedimentos, es altamente probable que la edificación no resista un movimiento telúrico de mayor magnitud o cercanía a la zona en cuestión.

En el mundo, del año 2000-2019, hubo 7348 grandes desastres registrados, que causaron la muerte de 1.23 millones de personas y afectaron a

4.2 mil millones de personas (algunas en más de una ocasión) y generaron una pérdida económica mundial de US\$2.97 billones aproximadamente (United Nations Office for Disaster Risk Reduction, 2019). Si se observa por continente, en total, entre 2000 y 2019, hubo 3068 en Asia, seguido de los 1756 eventos en América y los 1192 eventos en África (ver figura 2).

Figura 2

Porcentaje de desastres ocurridos en el mundo por continente



Fuente: United Nations Office for Disaster Risk Reduction, 2019.

En México, en el año 2020 ocurrieron desastres por fenómenos hidrometeorológicos, geológicos, químicos, socioorganizacionales y sanitarios, dejando un total de 392 personas fallecidas y una pérdida de hasta 3 276 338 miles de pesos en daños y pérdidas. Un total de 808 123 personas fueron afectadas (Dirección de Análisis y Gestión de Riesgos et al., 2021) (ver tabla 1).

Tabla 1

Consecuencias de los desastres en México en 2020. Desastres ocurridos en México durante el año 2020 debido a los diferentes riesgos

Fenómeno	Defunciones	Daños y pérdidas (miles de pesos)	Viviendas dañadas	Escuelas dañadas	Hospitales afectados	Población afectada
Hidrometeorológicos	110	27108 736	240 688	537	11	789 127
Geológicos	31	4916 302	2354	69	21	3169
Químicos	80	566 715.3	257	0	0	13 554
Socioorganizacionales	170	144 578.6	2	0	0	2186
Sanitarios	1	5.4	0	0	0	87
Total	392	32 736 338	243 301	606	32	808 123

Fuente: Dirección de Análisis y Gestión de Riesgos et al., 2021.

El Centro Nacional de Prevención de Desastres (CENAPRED), señala que en el periodo del año 2000 a 2015, el estado de Jalisco registró afectaciones valuadas en 5 mil 704.7 millones de pesos (ver tabla 2).

Tabla 2

Daños causados por desastres en Jalisco. Desastres ocurridos en Jalisco del año 2000 al 2015

Tipo desastre	Eventos	Muertes	Costo
Geológico	9	12	\$196 172
Hidrometeorológico	98	53	\$5 249 850
Químico	90	56	\$181 819
Socioorganizativo	145	255	\$76 870
Total	342	376	\$5 704 711

Fuente: Dirección de Análisis y Gestión de Riesgos et al., 2021.

En lo que va del año 2022 han ocurrido 6642 sismos en el mundo con una magnitud mayor a 4.6 en la escala de Mercalli Modificada (USGS, 2022), la cual es una cualificación dividida en niveles, de los daños ocurridos por un sismo, su nombre se debe al físico Giuseppe Mercalli que propuso esta tabla en 1902 y que fue modificada en 1931 y actualmente es la que más se utiliza en el continente americano (SGM, 2017).

De acuerdo con (CENAPRED, 2023), los peligros que se consideran de tipo geológico a los que se encuentra expuesta la población del municipio de Tonalá, Jalisco, son:

2.1. Inundaciones

El municipio de Tonalá, Jalisco se encuentra en la Región Hidrológica Lerma-Santiago, en la Cuenca Hidrológica RH 12-E Santiago-Guadalajara (CEA Jalisco, INEGI, 2005 y DOF, 2003); cuyos tributarios nacen de manera intermitente y perenne que desembocan en el Río Santiago.

Los peligros por inundaciones se dan cuando existe una alta concentración de agua procedente de la precipitación en cierta cantidad de tiempo (Ordaz, 2001). En la figura 3, podemos observar un claro efecto de una inundación ocurrida en el municipio de Tonalá en el estado de Jalisco (zona de interés del presente estudio), con consecuencias en 68 medios de transporte atrapados en el agua, debido al aumento de medio metro de esta (*El Informador*, 2014).

Figura 3

Inundaciones en el municipio de Tonalá, Jalisco del 17 de junio de 2014



Fuente: El Informador, 2014.

De acuerdo con CENAPRED (2023), las inundaciones no se consideran como peligro geológico, sino hidrometeorológico. Sin embargo, considerando la información proveniente de (CENAPRED, 2020 y Lario y Bardají, 2017), una lluvia intensa puede incrementar las posibilidades de reblandecimiento y debilidad del terreno, considerando el intemperismo de las rocas, zonas de fracturamiento y bloques que ya se encuentren sueltos. Un ejemplo acontecido en el municipio de Tonalá, Jalisco el día 31 de agosto de 2023 fue un derrumbe ocurrido en el Cerro del Rey, en los límites de las Colonias Rey Xolotl y Vista del Rey (ver figura 4).

Figura 4

Imagen satelital que muestra la ubicación del derrumbe ocurrido en el Cerro del Rey en el Municipio de Tonalá, Jal.



Fuente: Google maps, 2023.

Lo que ocurrió fue que hubo una caída de lluvia extraordinaria, hubo inundaciones por toda la Zona Metropolitana de Guadalajara, incluyendo el municipio de Tonalá (Quadratin Jalisco, 2023). Los fragmentos de roca que se encontraban sueltos o ya fracturados, ante tal saturación de agua, terminaron cediendo y cayendo hacia las unidades habitacionales de los límites de las colonias Rey Xolotl y Vista del Rey (ver figuras 5, 6 y 7). Afortunadamente, las consecuencias fueron solamente daños a una reja de la parte de atrás de una casa. Sin embargo, queda el antecedente de que pudiera continuar ocurriendo este tipo de percances.

Figura 5, 6 y 7

Derrumbe ocurrido en el Cerro del Rey en el municipio de Tonalá, Jal.



Fuente: Azteca Jalisco, 2023; El Heraldo de México, 2023 y elaboración propia.

2. Inestabilidad de laderas

Otro tipo de peligro es el movimiento de ladera, que es la caída por gravedad de ciertos materiales que han sufrido algún proceso de intemperismo, sismicidad, o sin haber ocurrido ningún proceso, pero podría contener algún tipo de roca poco consolidada, fallas ocurridas en su estructura, aumento o eliminación de agua del macizo rocoso o cambios en el uso de suelo. Pueden ocurrir en grandes masas o pequeños bloques, ya sea en

forma de caída libre o deslizando sobre una capa en particular (Llorens y Masquef, 2009). Este tipo de fenómenos, pueden generar afectaciones en pequeña o gran escala. Por ejemplo, el 12 de abril de 2012, ocurrió un gran deslizamiento en la ciudad de Ropoto, Grecia (ver figura 8), cuya afectación fue más que catastrófica, puesto que la zona quedó completamente inhabitable. En esta localidad, 300 personas tuvieron que evacuar después de años de pequeños agrietamientos que comenzaron a manifestarse desde 1960 (Gersango, 2020) (ver tabla 3).

Figura 8

Movimientos de ladera en la ciudad de Ropoto, Grecia el 12 de abril de 2012



Fuente: Gersango, 2020.

3. Sismicidad

El peligro sísmico se presenta cuando existe una ocurrencia de liberación de energía cuya intensidad, percepción y frecuencia, se presentan en una región (Buenrostro et al., 2021). Cabe mencionar, que un sismo es la liberación de energía del subsuelo (Estrada, 2012), que provoca movimientos

en la corteza terrestre; pueden o no activar las fallas geológicas existentes o pueden abrir un nuevo fracturamiento en la superficie. Y es también lo que hace tan característica la topografía de cada región y, que en conjunto nos permite definir cuáles son las zonas más aptas para diferentes actividades, tanto agrícolas, forestales, urbanas, civiles. Por ejemplo, en el caso de construir en una parte baja topográficamente, es de saberse que existe la tendencia a ocurrir inundaciones, más que en una parte alta. En este mismo sentido, si edificas sobre una falla geológica o sedimentos, es altamente probable que la edificación no resista un movimiento telúrico de mayor magnitud o cercanía a la zona en cuestión.

En el año 2022, el día 19 de septiembre, habiéndose cumplido 37 años del ocurrido el mismo día, pero del año 1985, ocurrió un sismo de 7.7 de magnitud con epicentro en Coalcomán, Michoacán y que causó daños en la estructura de algunas viviendas (ver figura 12), la pérdida de una vida humana y diversas fallas en el servicio eléctrico (Ayluardo, 2022).

Figuras 9,10, 11 y 12

Afectaciones generadas por el sismo del 19 de septiembre de 2022



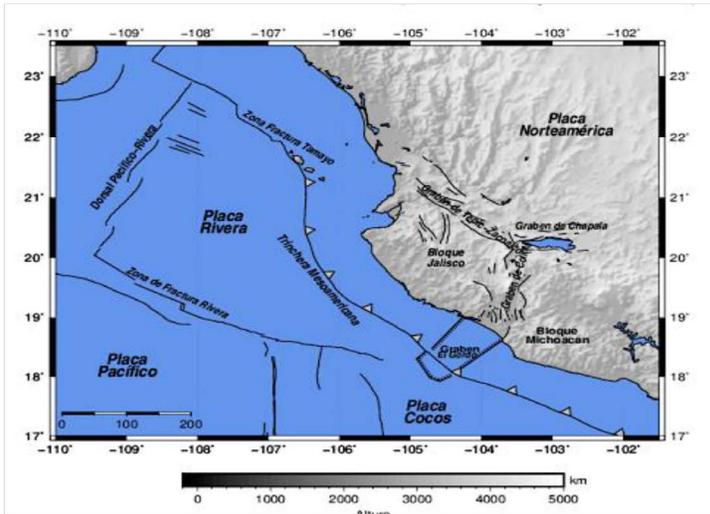
Fuente: Ayluardo, 2022

En este caso, la zona de estudio se ubica en la región occidente de México, donde ocurre la subducción de las placas de Cocos y Rivera en la Norteamericana, como se muestra en la figura 13. Así mismo, una zona denominada Bloque Jalisco que se encuentra delimitada por el Graben Tepic-Zacoalco, el Graben de Colima y el Graben de Chapala (Cabanillas, 2019; Buenrostro et al., 2021), lo cual, provoca una sismicidad considerada

de tipo B o baja, según la Regionalización Sísmica de la Comisión Federal de Electricidad (CFE, 2015).

Figura 13

Interacción de las placas de Cocos, Norteamericana y Rivera



Fuente: Cabanillas, 2019.

La sismicidad histórica más importante asociada a estos fenómenos y que es perceptible y repercute en el municipio de Tonalá, Jalisco se muestra en la tabla 3.

Tabla 3

Los sismos de mayor magnitud que han afectado el estado de Jalisco

Fecha	Magnitud	Lugar del epicentro
25 marzo 1806	7.5	Jalisco
31 mayo 1818	7.7	
20 enero 1900	7.6	
16 mayo 1900	7.1	
3 junio 1932	8.1	
18 junio 1932	7.8	
19 septiembre 1985	8.1	Michoacán
7 junio 1911	7.9	

Fecha	Magnitud	Lugar del epicentro
15 abril 1941	7.9	Colima
30 enero 1973	7.5	
03 junio 1932	8.1 réplica Jalisco	
07 abril 1845	7.5	Guerrero
24 diciembre 1899	7.9	
26 marzo 1908	7.8	
30 julio 1909	7.5	
16 diciembre 1911	7.8	
22 febrero 1943	7.7	
14 marzo 1979	7.9	Petatlán

Fuente: Buenrostro et al., 2021.

Los últimos sismos que se han registrado, cuya percepción se ha manifestado en Jalisco, particularmente en la zona de estudio, se muestran en la tabla 4.

Tabla 4

Tabla con la sismicidad actual perceptible en el estado de Jalisco

Fecha	Magnitud	Lugar del epicentro
19 septiembre 2022	7.7	Michoacán
20 septiembre 2022	5.9	
22 septiembre 2022	6.9	

Fuente: Delgado Vázquez et al., 2022.

4. Fenómenos volcánicos

Una erupción volcánica es uno de los fenómenos más impactantes que existen. En ellas se puede observar una majestuosidad de movimientos, liberación de gases, energía y grandes cantidades de roca fundida y fragmentos preexistentes de rocas que conforman el edificio volcánico. Sin embargo, también es un peligro, puesto que no solo la salida del material a altas temperaturas puede generar afectaciones, sino también la acumu-

lación de materiales más finos como cenizas pueden generar zonas de deslizamiento o de avalanchas al mezclarse con agua. De igual forma, la acumulación de gases en la atmósfera puede provocar lluvia ácida. Es debido a todo eso que es considerado un riesgo para la población que vive en zonas cercanas a un volcán. Un ejemplo pudo ser observado en el año 2018, cuando el volcán Kilawea en Hawái (BBC News, 2018), hizo erupción, llevándose consigo viviendas, medios de transporte (ver figura 14), cultivos, escuelas, vías de comunicación y vegetación.

Figura 14

La lava del volcán Kilawea en Hawai, arrasando con un vehículo



Fuente: BBC News, 2018.

La zona de estudio presenta una baja probabilidad de ocurrencia de desastres de tipo volcánicos. Sin embargo, deben considerarse la cercanía de los llamados aparatos volcánicos, como son la Caldera de la Primavera y el Volcán de Colima; este último, con actividad más reciente, cuya afectación provendría de la caída de ceniza que alcanzó a llegar hasta San Luis Potosí (Flores, 1987). La acumulación de este tipo de material además de tapan las tuberías de desagüe, si se llega a acumular en grandes cantidades puede colapsar los techos de viviendas más humildes.

Metodología

Se realizó un ejercicio de percepción sísmica en las diferentes colonias, fraccionamientos y comunidades pertenecientes a la población del municipio de Tonalá, Jalisco mediante un sondeo representativo de los peligros geológicos presentes en el municipio. Para este sondeo se hizo una encuesta de tipo analítica (Sánchez, et al., 2020) con un cuestionario de 12 preguntas (ver figura 15), la mayor parte de respuestas de opción múltiple, aunque también algunas que requieren información precisa, como es el caso del nombre de la colonia, fraccionamiento o zona del municipio en donde se encuentra su casa habitación o donde desarrolle la mayoría de sus actividades.

Figura 15
Las preguntas de investigación

- Preguntas**
- Sexo**
- Edad**
- 1.- ¿Vive en Tonalá?**
- a) Sí b) No
- 2.- ¿Cómo se llama su colonia?**
- 3. ¿Alguna vez ha considerado que su casa/colonia se puede deslizar ladera abajo?**
- a) Muy frecuentemente b) Frecuentemente c) Poco frecuentemente d) Nunca
- 4.- ¿A qué peligros cree que está expuesta su propiedad y su persona en el lugar en el que vive?**
- a) Derrumbe del cerro cercano a mi casa
b) Deslizamiento del terreno hacia zonas ladera abajo
c) Inundación de mi vivienda
d) Agrietamiento de mi casa por sismo
e) Todas las anteriores
f) Ninguna de las anteriores
- 5.- ¿Ha considerado que el lugar donde vive se puede inundar, ya sea en temporada de lluvias o en una lluvia extraordinaria?**
- a) Muy frecuentemente b) Frecuentemente c) Poco frecuentemente d) Nunca
- 6.- ¿Ha sentido un sismo?**
- a) sí b) no
- 7.- ¿sabe si vive en una zona sísmica?**
- a) sí b) no
- 8.- Si va por la calle mientras ocurre un sismo, ¿a dónde se dirige?**
- a) A mi casa
b) A un punto de reunión seguro
c) Me quedo donde estoy
d) A la iglesia
- 9.- Si está en su casa mientras ocurre un sismo, ¿cómo reacciona?**
- a) Me quedo esperando que pase el movimiento y sigo con mis actividades
b) Espero que pase el movimiento, salgo tranquilamente a la calle
c) Me meto debajo de una mesa
d) Mantengo la calma y posteriormente salgo tranquilamente a un punto seguro
- 10.- ¿Cuál es el medio de comunicación por el cual se informa si ocurre un desastre?**
- a) televisión
b) radio
c) internet
d) Alerta sísmica
- 11.- ¿A dónde acudiría si ocurriera alguno de los fenómenos mencionados anteriormente?**
- a) Al hospital b) a protección civil c) me quedo en casa d) voy a la iglesia e) me dirijo a un lugar seguro f) voy a un punto de reunión

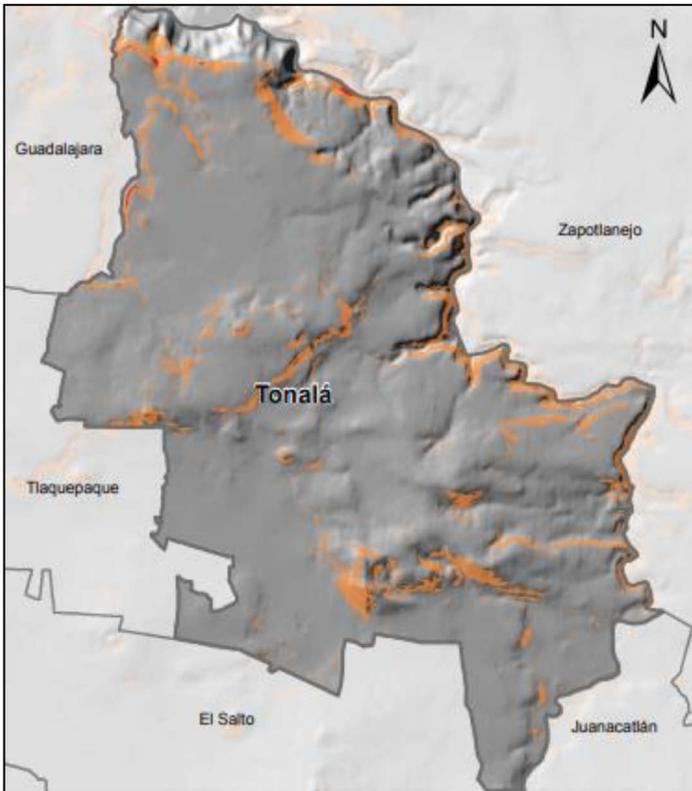
Fuente: elaboración propia.

Las preguntas van enfocadas a su percepción de los peligros geológicos que pudieran encontrar en la zona en la que se desenvuelven las personas. La encuesta se realizó mediante la difusión del cuestionario digital vía formulario de Google, por medio de redes sociales. Se difundió con personas conocidas en la zona, en grupos de difusión de la zona mediante la red social Facebook y también por medio de la aplicación de mensajes WhatsApp. En este sentido, en la zona de estudio, se observan algunas zonas

con posibilidad de deslizamiento de ladera (ver figura 16). De acuerdo con (CENAPRED, 2023), el municipio de Tonalá se encuentra con una alta susceptibilidad de deslizamiento de terreno o caída de bloques. En la tabla 3 se muestra el porcentaje por distribución geográfica dividiéndolo desde muy bajo hasta muy alto (CENAPRED, 2020).

Figura 16

Mapa de susceptibilidad de deslizamiento de laderas del municipio de Tonalá, Jalisco



Fuente: CENAPRED, 2023.

Continuando con el derrumbe del Cerro del Rey como ejemplo ocurrido de deslizamiento de ladera que definitivamente sí ocurre, se presentan algunas imágenes de lo cercana que se encuentra este cerro o bloque de macizo rocoso y la no adecuada planificación urbana (Figuras 17 y 18). Se pueden observar las casas encima de la zona potencial de derrumbe. No

tiene una cubierta vegetal que permita que deje de ocurrir el intemperismo de este macizo rocoso. Y justamente se encuentra en una de las zonas marcadas con color naranja del mapa de susceptibilidad de deslizamiento de laderas.

Figuras 17 y 18

Imagen de la zona del derrumbe ocurrido en el Cerro del Rey en el Municipio de Tonalá, Jal.



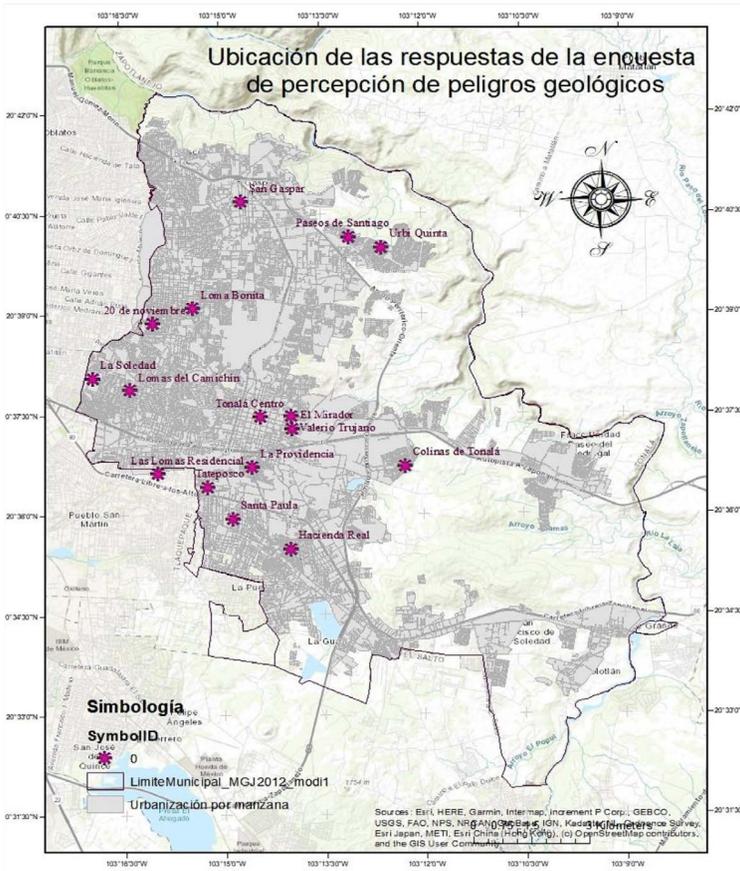
Fuente: elaboración propia

Una vez aplicado el ejercicio de campo, se obtuvo una respuesta de 119 personas divididas entre 13 colonias: Tateposco, Colinas de Tonalá, Las Lomas Residencial, San Gaspar, El Mirador, Hacienda Real, Tonalá Centro, Urbi Quinta, 20 de Noviembre, Paseos de Santiago, La Soledad, Santa Paula, La Providencia, Valerio Trujano, Lomas del Camichín y Loma Bonita (ver figura 19).

Posteriormente se analizan las respuestas de manera cualitativa, puesto que es la representación de una población en distintos puntos y en donde las características son diferentes. En este caso, se pueden observar los distintos peligros a los que se encuentran expuestas las personas que decidieron responder a las encuestas.

Figura 19

Se observan las diferentes localizaciones de donde se obtuvieron respuesta a las encuestas

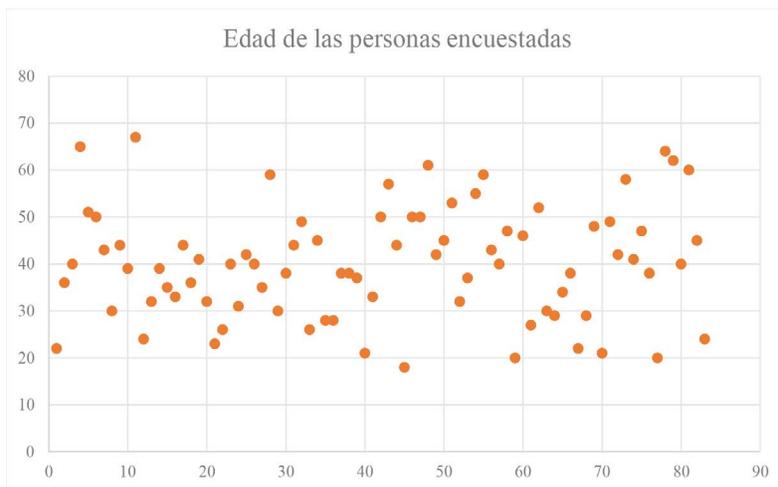


Fuente: elaboración propia.

Resultados

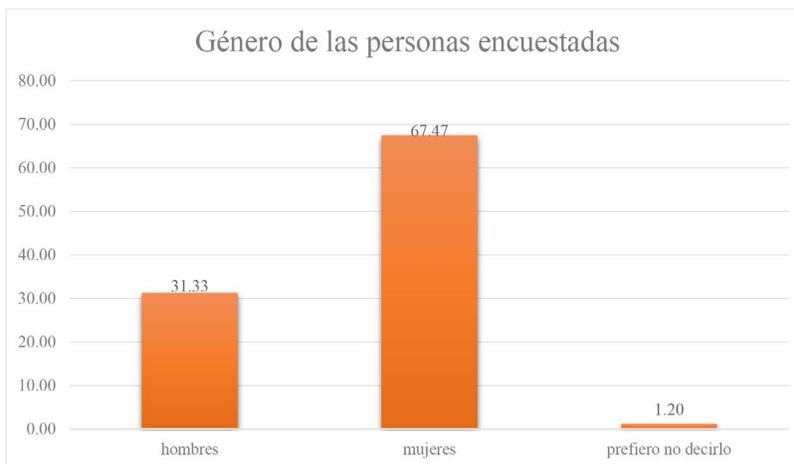
En este sentido, podemos observar que el 68 % de las personas encuestadas son mujeres, el 31 % son hombres y solo una persona decidió no mencionar el género al que pertenece (ver figura 20) y las edades varían desde los 18 años hasta los 67 (ver figura 21).

Figura 20
Gráfica que muestra las diferentes edades de las personas encuestadas



Fuente: elaboración propia.

Figura 21
Gráfica que muestra el porcentaje de participación en la encuesta por género



Fuente: elaboración propia.

En este contexto, el 49 % de las personas encuestadas nunca han considerado que su hogar o lugar donde pasan la mayor parte del tiempo (donde

respondieron la encuesta), pueda deslizarse ladera abajo. Solo el 4 % de las personas encuestadas consideran muy frecuentemente la posibilidad de deslizamiento de ladera de su casa o colonia (ver figura 22). Sin embargo, solo el 6 % de los encuestados considera que existe una alta posibilidad de inundación del lugar donde vive; mientras que el 48 % considera que nunca se podrá inundar su zona habitacional (ver figura 23 4).

Figura 22
Percepción social sobre el deslizamiento



Fuente: elaboración propia

Figura 23
Percepción social sobre las inundaciones



Fuente: elaboración propia

En función de lo anterior, el 70 % de la población no sabe que se

encuentra viviendo en una zona de baja sismicidad (ver figura 24), sin embargo, el 95 % de las personas han sentido un sismo, de las cuales el 77 % sintió uno de los sismos más actuales que fue el del 19 de septiembre de 2022, cuya magnitud fue de 7.7 de magnitud (Delgado Vázquez et al., 2022) y lo calificaron como leve el 21 % de los encuestados, según la escala de Mercalli modificada (ver figura 25).

Figura 24
Percepción social sobre la sismicidad



Fuente: elaboración propia

Figura 25
Escala modificada de Mercalli en donde se muestra la intensidad con que se sienten los eventos sísmicos



Fuente: SGM, 2023.

También se les preguntó a dónde se dirigirían en caso de que fueran por la calle y ocurriera un sismo. El 81 % de las personas respondió que se

dirigía a un punto de reunión seguro. Por otro lado, cuando se encuentran en sus casas el 83 % menciona que mantiene la calma y posteriormente se dirige a un lugar tranquilo, el 15 % espera que pase el movimiento y sale tranquilamente a la calle (ver figuras 26 y 27).

Figuras 26 y 27

Percepción social sobre la reacción ante un sismo

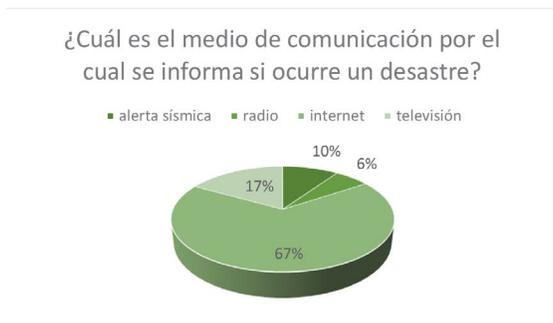


Fuente: elaboración propia

De las personas encuestadas, el 67 % considera que se mantiene informada mediante el internet, el 17 % se mantiene al tanto de las indicaciones mediante la televisión. El 17 % se entera por la alerta sísmica y el 6 % mediante el radio (ver figura 28).

Figuras 28

Percepción social sobre la fuente de obtención de información de desastres



Fuente: elaboración propia

Cuando se tiene una adecuada gestión urbana sostenible mediante el es-

tudio integral de la zona por urbanizar, una planificación y ordenamiento territorial adecuado disminuyen los riesgos. En este sentido, un ejemplo es el encontrado en la zona denominada “Coyula”, con mayor exactitud el fraccionamiento “Paseos de Santiago”, en el cual se encuentra un antiguo arroyo de tipo intermitente cuyo cauce no fue modificado, sino que se transformó en lo que se conoce como Parque Lineal, lleno de árboles y vegetación; respetando el cauce y los 10 metros de ancho contiguo a la altura del nivel de aguas máximas extraordinarias Figuras 17 y 18 (DOF, 2023). Además, el fraccionamiento presenta una pendiente hacia dicho arroyo y es debido a esto que podría considerarse difícil la acumulación de agua en las casas habitación (ver figuras 29 y 30).

Figuras 29 y 30

Condiciones del Parque Lineal Urbi Quinta Paseos de Santiago



Fuente: elaboración propia

Es relevante mencionar, que en respuesta a la encuesta realizada, esta zona no es considerada con percepción de inundación, lo cual confirma que se ha realizado una gestión urbana sostenible. Por el contrario, existen también zonas en las que las personas se desenvuelven sin darse cuenta de las condiciones en las que se encuentra su entorno. A continuación, se mostrarán una serie de fotografías de algunos lugares transitados por habitantes del municipio de Tonalá (ver figuras 31 y 32).

Figura 31 y 32

Se muestran algunos ejemplos de edificaciones en zonas aledañas a la ladera de la barranca del Río Santiago



Fuente: elaboración propia

Conclusiones

Cuando ocurren desastres provocados por fenómenos geológicos, no podemos mencionar con exactitud la frecuencia; algunos como los sismos que ocurren sin que podamos pronosticarlos o las inundaciones que se dan en temporada de lluvias. Sin embargo, cada que ocurren y existen daños tales como pérdidas económicas, personas heridas, fallecidos, hablamos de que son situaciones que no debieron de ocurrir o que se pudieron haber prevenido.

En este sentido, después de analizar el resultado de las encuestas y los mapas de deslizamiento de laderas. Además de la observación directa en campo, se puede concluir que las personas sí están conscientes del lugar en el que viven y los diferentes peligros a los que se encuentran expuestos. Sin embargo, es importante mencionar que, hace falta mayor difusión y medidas de prevención, mitigación, planes de resiliencia y una adecuada planificación que lleve a una gestión urbana sustentable.

Referencias bibliográficas

- Ayluardo, A. (2022, septiembre 19). 48 millones percibieron el sismo de este 19-S de 2022. *Publimetro*. <https://www.publimetro.com.mx/noticias/2022/09/20/sismo-19-septiembre-2022-reporte-de-afectaciones-impacto-y-replicas/>
- BBC News. (2018, mayo 9). En *Hawái, la lava del volcán Kīlīuea engulle un coche*. <https://www.bbc.com/afaanoromoo/oduu-44053089>
- Buenrostro, A. M., Bernal, A. G., & García, H. J. (2021). Análisis de peligro sísmico y efectos de sitio para la Zona Metropolitana de Guadalajara. *Revista Internacional de Ingeniería de Estructuras*, 26(1). <https://doi.org/10.24133/riie.v26i1.1960>
- Cabanillas, J., L. (2019). *Establecimiento y análisis de la nueva red geodésica regjal con fines geodinámicos para el estudio del bloque de Jalisco, México*. [Universidad de Guadalajara]. https://www.researchgate.net/profile/Juan-Cabanillas-2/publication/337242810_ESTABLECIMIENTO_Y_ANALISIS_DE_LA_NUEVA_RED_GEODESICA_REGJAL_CON_FINES_GEODINAMICOS_PARA_EL_ESTUDIO_DEL_BLOQUE_DE_JALISCO_MEXICO/links/5dccb2eb4585156b3510707e/ESTABLECIMIENTO-Y-ANALISIS-DE-LA-NUEVA-RED-GEODESICA-REGJAL-CON-FINES-GEODINAMICOS-PARA-EL-ESTUDIO-DEL-BLOQUE-DE-JALISCO-MEXICO.pdf
- CENAPRED (2023). *Información básica de peligros naturales a nivel municipal. Estado Jalisco Municipio Tonalá 14101*. Dirección de Análisis y Gestión de Riesgos. Dirección de Investigación.
- Comisión Estatal del Agua Jalisco CEA (2005). *Regiones Hidrológicas de Jalisco*. https://www.ceajalisco.gob.mx/contenido/cuencas_jalisco/#:~:text=El%20Estado%20de%20Jalisco%20contiene%20siete%20Regiones%20Hidrol%C3%B3gicas.
- Comisión Federal de Electricidad. (2015). *Manual de Diseño de Obras Civiles*. https://www.academia.edu/37098742/Comisi%C3%B3n_Federal_de_Electricidad_Manual_de_Dise%C3%B1o_de_Obras_Civiles
- Delgado Vázquez, M. A., Escudero A., C. R., García G, E. X., Águila L., J., Carrillo S, O., Guerrero R., G., & Ramos C. N. M. (2022). *Reporte del sismo del 19 de septiembre de 2022 en las costas del Estado de Michoacán y las réplicas del 20 y 22 de septiembre*.

- Derrumbe de cerro en Tonalá deja daños en viviendas de Tlaquepaque. (2023, agosto 31). *El Herald* de México. <https://heraldodemexico.com.mx/nacional/2023/8/31/derrumbe-de-cerro-en-tonala-deja-daños-en-viviendas-de-tlaquepaque-534872.html>
- Diario Oficial de la Federación (2023). *Ley de Aguas Nacionales*. Última reforma publicada DOF 08-05-2023
- Dirección de Análisis y Gestión de Riesgos, Subdirección de Estudios Económicos y Sociales, y Centro Nacional de Prevención de Desastres. (2021). *Impacto socioeconómico de los principales desastres ocurridos en México* (p. 20).
- El Informador (2014, junio 17). Tormenta afecta calles de Tonalá. *El Informador*. <https://www.informador.mx/Jalisco/Tormenta-afecta-calles-de-Tonala-20140617-0001.html>
- Estrada, L. (2012). *Sismología para Geólogos*. <https://catedras.facet.unt.edu.ar/geofisica/wp-content/uploads/sites/4/2014/02/Sismologia-para-Geologos.pdf>
- Flores Díaz, J. (1987). Las Erupciones del Volcán Colima. *Cuadernos de Difusión científica de la Universidad de Guadalajara*. Núm. 10:17-18.
- Fotogalería: Autos varados y avenidas inundadas en Guadalajara tras la lluvia. (2023, septiembre 1). *Azteca Jalisco*. <https://www.aztecajalisco.com/azteca-noticias/fotogaleria-autos-varados-avenidas-inundadas-guadalajara-lluvia>.
- Francisco Rodríguez (2023). Tormenta desquicia y ahoga al AMG. *Quadratin Jalisco*. <https://jalisco.quadratin.com.mx/principal/tormenta-desquicia-y-ahoga-al-amg/>
- Gersango (2020, octubre 17). Movimientos de ladera y el caso de Ropoto. *Ingeododo Geología, ingeniería geológica, geotecnia y cimentaciones especiales*. <https://ingeododo.com/2020/10/17/movimientos-de-ladera-y-el-caso-de-ropoto/>
- INEGI (2005). *Descarga masiva*. Instituto Nacional de Estadística y Geografía. INEGI. <https://www.inegi.org.mx/app/descarga/default.html>
- Lario, J., & Bardají, T. (2017). *Introducción a los riesgos geológicos* (septiembre de 2017). Editorial UNED.
- Llorens, R. C., & Masquef, A. T. (2009). 284 Movimientos de ladera. *En Enseñanzas de las ciencias de la tierra*, 17, 284-294. <https://scholar.googleusercontent.com/scholar?q=cache:73b6lhKNBsJ:scholar.google>

- [com/+movimiento+de+laderas&hl=es&as_sdt=0,5](#)
- Ordaz, J. (2001). Desastres naturales y catastrofismo en el siglo XVIII. *Cuadernos de Estudios del Siglo XVIII*, 10-11. <https://doi.org/10.17811/cesxviii.10-11.2001.93-106>
- Sánchez Huarcaya, A. O. (2020). *Los métodos de investigación para la elaboración de las tesis de maestría en educación*. <https://files.pucp.education/posgrado/wp-content/uploads/2021/01/15115158/libro-los-metodos-de-investigacion-maestria-2020-botones-2.pdf>
- SGM. (2017, enero 15). *Escalas de los sismos*. Servicio Geológico Mexicano. https://www.sgm.gob.mx/Web/MuseoVirtual/Informacion_complementaria/Escalas-sismos.html
- Tarback, E. J., & Lutgens, Frederick K. (2005). *Ciencias de la Tierra* (8a ed.). Pearson Education S. A.
- United Nations Department of Economic and Social Affairs. (2023). *Informe de los Objetivos de Desarrollo Sostenible 2023: Edición especial*. United Nations. <https://doi.org/10.18356/9789210024938>
- United Nations Office for Disaster Risk Reduction. (2019, octubre 12). *Human cost of Disasters*. An overview of the last 20 years 2000-2019. <https://www.undrr.org/es/news/dirrd-informe-de-onu-muestra-gran-aumento-en-desastres-de-origen-climatico>
- USGS. (2022). *Latest Earthquakes*. *Lastest Eartquakes*. <https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/map/?extent=-86.65723,-187.73438&extent=86.61598,547.73438&range=search&sort=oldest&timeZone=utc&search=%7B%22name%22:%22Search%20Results%22,%22params%22:%7B%22starttime%22:%222022-01-01%2000:00:00%22,%22endtime%22:%222022-11-10%2023:59:59%22,%22minmagnitude%22:4.5,%22orderby%22:%22time-asc%22%7D%7D>

Capítulo 1.2

Capacidad de carga turística en playa Novillero, Nayarit, México

Oyolsi Nájera González¹

Nereyda Madai Beltrán Bojórquez²

Susana María Lorena Marceleno Flores³

Areli Nájera González⁴

<https://doi.org/10.61728/AE24004251>



¹ Profesor investigador de la Universidad Autónoma de Nayarit. *e-mail:* oyolsi@uan.edu.mx

² Egresada de la Maestría en Ciencias para el Desarrollo, Sustentabilidad y Turismo de la Universidad Autónoma de Nayarit.

³ Profesora investigadora de la Universidad Autónoma de Nayarit. *e-mail:* susana.marceleno@uan.edu.mx

⁴ Profesora investigadora de la Universidad Autónoma de Nayarit. *e-mail:* areli.najera@uan.edu.mx

Introducción

El turismo ha experimentado un crecimiento exponencial significativo año tras año, siendo una de las actividades económicas más relevantes en México, especialmente el turismo de sol y playa. Sin embargo, este crecimiento ha generado impactos negativos tanto sociales como ambientales debido a la creciente afluencia de visitantes, su estacionalidad y la ineficiente administración de los espacios litorales, lo que no compensa adecuadamente los ingresos económicos.

A lo largo del tiempo, se han desarrollado diversos enfoques de análisis e instrumentos metodológicos para detectar, evaluar y mitigar los impactos generados por el turismo, algunos de los cuales se basan en el concepto de capacidad de carga turística. Según García, de la Calle y Mínguez (2011), los estudios sobre capacidad de carga han sido pioneros en hacer operativo el concepto de sostenibilidad en la gestión turística.

Inicialmente utilizado en 1964 en la crianza de ganado para estimar la cantidad de animales que un ecosistema podía soportar sin dañarlo, el concepto de capacidad de carga se ha aplicado posteriormente a otros contextos, como indicador de niveles aceptables de uso recreativo en áreas naturales protegidas y en destinos turísticos más complejos, teniendo en cuenta el comportamiento de los visitantes. Con el tiempo, la percepción social de los impactos del turismo ha ganado importancia (García, de la Calle y Mínguez, 2011).

Según Wang y Zhu (2014), el turismo costero está asociado al desarrollo del turismo masivo, y el presupuesto gubernamental se destina principalmente al marketing internacional sin considerar adecuadamente los impactos ambientales y sociales. En este contexto, la investigación sobre capacidad de carga en destinos turísticos complejos se ha desplazado hacia el desarrollo de marcos teórico-conceptuales para la planificación y gestión turística (García y de la Calle, 2012).

Aunque la capacidad de carga turística se aplica principalmente en áreas protegidas o espacios acotados, Zelenka y Kacetl (2012) sugieren que es

factible estimarla en sitios sin delimitaciones físicas, ya que es relativa y dinámica. Es esencial reconocer que los territorios costeros no pueden ser ocupados homogéneamente debido a sus distintas vocaciones de uso, lo que requiere criterios diferentes de intensidad de uso (Aranguren et al., 2008).

Según García y de la Calle (2012), la capacidad de carga turística de un espacio está determinada principalmente por la dimensión del concepto más restrictivo en cada caso, ya sea ecológico, económico, físico, perceptual o social, como en los siguientes casos: capacidad de carga ecológica en las Islas Galápagos (Cifuentes, 1996) o en los parques nacionales de Estados Unidos (Lindsay, 1996), capacidad de carga económica en el caso de la ciudad de Venecia (Canestrelli and Costa, 1991), capacidad de carga física con relación a infraestructuras básicas en la Costa del Sol (Navarro, 2003), capacidad de carga perceptual en las playas de la isla de Menorca (Roig i Munar, 2003) o capacidad de carga social en la ciudad de Oxford (Glasson, 1994).

También se han planteado diversas propuestas de modelos para determinar la capacidad de carga recreativa, algunas basadas en cálculos matemáticos y otras en experiencias empíricas (Van Wagtenonk y Botti, 1984; Stankey et al., 1985; Loomis y Graefe, 1992; Boullón, 1985; Cifuentes et al., 1992; Lozato-Giotart, 1992; Cayot et al., 1996; Mitraud, 1998; Brenes et al., 2004). En destinos de sol y playa, donde predomina el uso recreativo, se ha optado por la capacidad de carga recreativa como herramienta de planificación y gestión del turismo, siendo útil para prevenir impactos y promover la conservación (Morant y Viñals, 2008; Chávez, 2022).

En definitiva, la capacidad de carga turística no es un fin en sí misma, sino un instrumento para los procesos de planificación y gestión turística (García y de la Calle, 2012), siendo una estrategia potencial para reducir impactos ambientales en espacios naturales o poco transformados (Ramos et al., 2023). Al contextualizarla en el uso recreativo de áreas naturales, además de los parámetros biológicos del sitio frente a los impactos turísticos, también es importante considerar la calidad de la experiencia del visitante (Moore, 1993).

Estos objetivos delinear la categoría de manejo y restringen los usos dentro del área, lo que implica revisar periódicamente y ajustar la capacidad de carga según las circunstancias cambiantes del sitio (Cifuentes,

1992). En todos los lugares, se requieren estudios sobre la capacidad de carga en destinos turísticos para cada proyecto, con el fin de regular esta actividad y evitar la sobreexplotación de los recursos (Ortiz, 2006), ya que el turismo, como señalan García y de la Calle (2012), ejerce un impacto significativo en el territorio y los recursos que utiliza.

El enfoque de este estudio es la aplicación metodológica de la capacidad de carga en la actividad turística de Playa Novillero, que según la OMT (1981), representa el máximo de visitantes que un área puede recibir sin causar alteraciones inaceptables en el medioambiente y la calidad de la experiencia del visitante. Shelby y Herberlin (1986) añaden que es el nivel de uso que supera los límites aceptables definidos en estándares previamente consensuados.

El propósito es establecer “un sistema de indicadores que proporcionen información continua y relevante a los responsables del turismo sobre el nivel de uso que puede soportar un sitio turístico, natural o artificial, para preservar su equilibrio ambiental y mantener la satisfacción de los visitantes, fortaleciendo así su atractivo a largo plazo” (López y López, 2008, p. 137).

Playa Novillero se extiende a lo largo de 82 km de litoral y 50 m de ancho en el municipio de Tecuala, al norte del estado de Nayarit, México. Su tamaño le ha valido el reconocimiento internacional como la “Playa más larga de Latinoamérica” según el Record Guinness, y es considerada la más segura del país. Forma parte de La Barra de Novillero, un sistema costero compuesto por cordones litorales alineados al mar y longitudinalmente a la costa, delimitado al norte por la boca de Teacapán, al este por el estero que conduce a la laguna de Agua Brava, y al sur disectada por el canal de Cuautla.

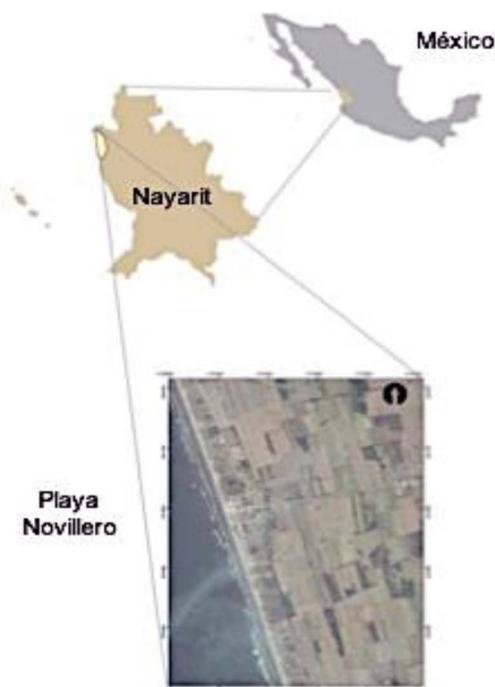
Es una playa de acceso público a través de una sola vía, una carretera de doble sentido que parte del municipio de Tecuala y cruza un puente de casi 100 m sobre el canal de La Barra. El ejido, El Novillero, al que pertenece, cuenta según datos del INEGI (2020) con 248 habitantes en 292 viviendas, dedicados principalmente a la pesca de camarón y pescado.

Un estudio realizado por la UAN en 2002 reveló una rica biodiversidad que incluye 3163 ha de manglares (15 % del área), 42 especies de flora y 88 de animales silvestres, destacando las aves (48 %) en número de especies, seguidas de la fauna acuática, mamíferos y reptiles.

Desde el punto de vista productivo, La Barra de Novillero es vulnerable debido a la concentración de actividades primarias (agrícolas, ganaderas y pesqueras). Además, los recursos naturales disponibles tienen un bajo nivel de uso turístico y acuícola (UAN, 2002).

A pesar de su gran extensión, la oferta hotelera se limita a cinco establecimientos (según datos del INEGI de 2018, Tecuala cuenta con 12 establecimientos de alojamiento temporal). Además, se tienen hoteles, restaurantes, palapas para alquilar, áreas de camping y espacios para eventos deportivos y recreativos. Sin embargo, carece de baños y duchas públicas (disponibles solo en restaurantes), estacionamiento, alumbrado público, botes de basura y centro de información turística, entre otros servicios (ver figura 1).

Figura 1
Área de estudio



Fuente: Elaboración propia, 2017.

Metodología

A priori, no existe una fórmula universal para calcular el número máximo de personas que un espacio turístico puede albergar, y aunque es un concepto tratado ampliamente en la literatura científica, resulta difícil encontrar metodologías aplicables a la especificidad de cada caso (García, de la Calle y Mínguez, 2011). Por lo tanto, en este estudio se adoptó una aproximación al cálculo adecuado de visitantes siguiendo la reflexión metodológica de García Hernández (2003), que consta de tres fases adaptadas a las particularidades del caso de estudio:

1. Zonificación del área de estudio según el uso que hacen los visitantes y la identificación de espacios clave que presentan problemas de sobrecarga o saturación turística. Este enfoque busca comprender el funcionamiento turístico del espacio mediante el análisis de sus diferentes componentes.
2. Desglose en dos componentes fundamentales en la fase analítica: uno descriptivo y otro evaluativo.
3. Estimación de la capacidad de carga en tres dimensiones: física (número de personas que pueden caber físicamente en un espacio), social o perceptual (evaluación de los niveles de masificación y/o saturación turística) y operativa (considerando criterios de gestión como seguridad y servicios entre otros).

Siguiendo la metodología clásica de Cifuentes (1996), se intentó perfilar escalonadamente la capacidad de carga efectiva de Playa Novillero ponderando su capacidad de carga física, las reducciones debidas al uso específico del lugar y las restricciones de gestión (capacidad de gestión/manejo).

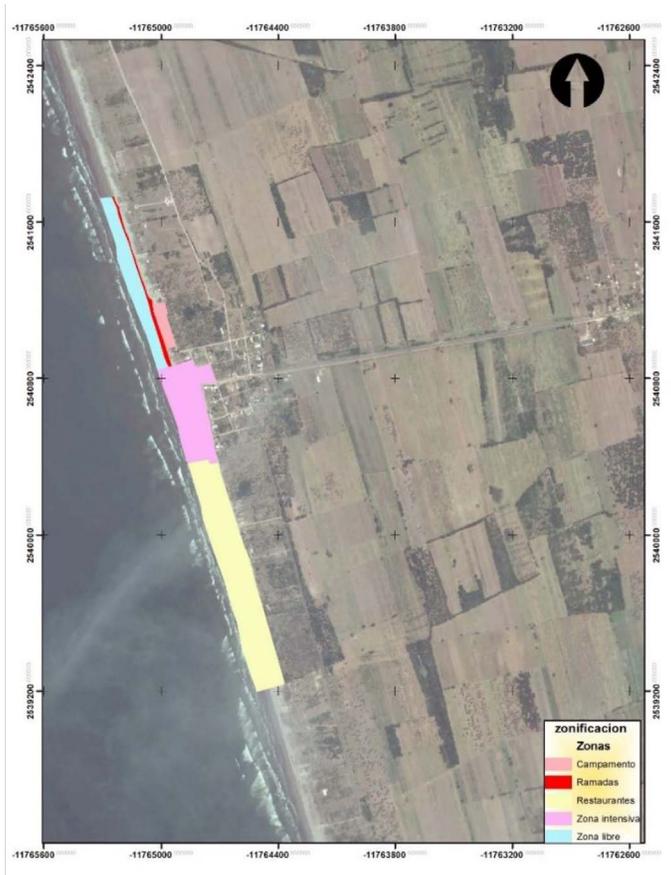
Resultados

a) Zonificación de Playa Novillero

Aunque físicamente Playa Novillero carece de barreras naturales o artificiales que limiten el movimiento de los visitantes, se observa que estos tienden a distribuirse de manera homogénea según el tipo de actividad que realizan. Por lo tanto, se propuso una zonificación basada en el uso del área de estudio: la “zona de restaurantes” (amarillo) para comer, la “zona

intensiva” (lila) para recreación deportiva o entretenimiento, la “zona libre” (azul) y “zona de ramadas” (rojo) para bañistas que consumen sus propios alimentos y bebidas, y la “zona de acampar” (rosa) para quienes pernoctan en la playa (ver figura 2).

Figura 2
Área de estudio zonificada



Fuente: Elaboración propia (2017).

b) Análisis descriptivo y evaluativo de Playa Novillero

Siguiendo la reflexión de García, de la Calle y Mínguez (2011, p. 220) sobre el concepto de capacidad de carga, se han desarrollado diferentes metodologías para los objetivos de cada destino turístico, una de ellas contempla un análisis descriptivo y otro evaluativo, para el área en estudio se establecieron de la siguiente manera:

Caracterización de los visitantes

Siguiendo las recomendaciones de la OMT (1995) sobre la tipificación estadística de los viajeros con fines turísticos, los visitantes de Playa Novillero pueden clasificarse de la siguiente manera:

1. Zonificación- Tipo de Visitante
2. Zona Libre- Excursionista
3. Zonas de Campamento- Turista
4. Zona de Restaurantes- Excursionista
5. Zona de Ramadas- Excursionista
6. Zona Intensiva- Turista y/o Excursionista

Según el perfil del visitante, varían sus prácticas, la duración de su estancia y el acceso a servicios, así como la contemplación del mar. A continuación, se presenta una descripción de la caracterización y las actividades de ocio de los visitantes según la zona en la que se ubican, basada en encuestas y observación directa.

Excursionista en Zona Libre (EZL):

- Visitante que viaja en grupos grandes de familia y/o amigos, principalmente por tradición y para disfrutar del mar tranquilo.
- Llega en automóvil particular.
- Estaciona su vehículo en la playa.
- Se instala con sombrilla, toldo, mesa y sillas.
- Disfruta del mar y consume sus propios alimentos y bebidas.

- Permanece de dos a máximo 8 horas.
- Recoge sus pertenencias y la mayoría deja la basura en el sitio contenida en una bolsa.

Turista en Zona de Campamento (TZC):

- Grupos grandes de familia (10 o más personas) que practican el campismo tradicionalmente.
- Proviene de regiones cercanas (Rosamorada, Tepic, Guadalajara, Mazatlán o Culiacán).
- Llegan uno o varios días antes de los días santos.
- Se instalan en áreas no transitables de la playa.
- Llevan casas de campaña, alimentos, utensilios de cocina, agua potable y otros suministros.
- Construyen baños austeros en la playa (cavando un hoyo en la arena, poniendo sobre él una cubeta o estructura de madera a tipo de asiento y lo rodean con bolsas o tela para cubrirlo).
- Su estancia suele ser de 6 a 8 días.
- Retiran su campamento y llevan la basura al poblado o contenedor más cercano.

Excursionista en Zona de Restaurantes (EZRE):

- Visitante con estancias cortas.
- son los únicos con acceso a las duchas y baños ya que estos se encuentran solo en los restaurantes, además su ubicación les permite contemplar el mar, debido a que no tienen ramadas enfrente ni circulación de vehículos sobre la playa en esta zona.
- Llega al mediodía.
- Estaciona su automóvil en el restaurante elegido.
- Consumen alimentos y bebidas en el restaurante.
- Pueden o no bañarse en el mar.

Excursionista en Zona de Ramadas (EZRA):

- Viaja en grupos pequeños (4 personas).
- Pagan por el alquiler de una ramada.
- Estacionan sus vehículos frente a la ramada (incluye mesa y sillas).
- Por su ubicación detrás de los excursionistas en zona libre, no pueden contemplar el mar debidamente y además son quienes corren mayor peligro de ser atropellados, puesto que tiene frente a ellos la circulación de automóviles y motocicletas.
- Deben llevar sus propios alimentos y bebidas (la renta de la ramada no incluye servicio de alimentos y bebidas).
- Pueden o no bañarse en el mar.
- Dejan la basura en el sitio en una bolsa o la llevan consigo.

Turista y/o Excursionista en Zona Intensiva (TEZI):

- Esta zona alberga hoteles, restaurantes y ramadas, y es el lugar de eventos deportivos y concursos.
- Las personas concentradas en el lugar pueden ser turistas (personas que se hospedan en los hoteles o campistas) o excursionistas (personas que vienen de la zona libre, ramadas o restaurantes).
- La duración de la estancia varía según el visitante.
- Participan en actividades deportivas, concursos y eventos.

En la Tabla 1, se muestra las diferencias en prácticas y ventajas entre los diferentes tipos de visitantes. Se marca con una “X” como afirmación, un espacio en blanco como negación y un guion medio “-” como variable.

Tabla 1

Prácticas y desventajas entre los diferentes tipo de turistas

Visitante	Acceso libre a duchas y baños	Estancia larga (más de 3 horas)	Vista directa del mar	Lleva su propio alimento y bebida	Dejan basura en la playa	Se estaciona sobre la playa
EZL		X	X	X	X	X
TZC		X		X		
EZRE	X		X			
EZRA		X		X	X	X
TEZI		-	X	-	X	-

Fuente: elaboración propia con base en el trabajo de campo, Abril 2017.

Las modalidades turísticas pueden categorizarse según varios criterios: funcionales (según la motivación), sociales (según el tipo de turista), espaciales (según las características del destino) y temporales (según la estacionalidad). En Playa Novillero, observamos un turismo de sol y playa (funcional), altamente estacional y concentrado en períodos festivos, especialmente en Semana Santa.

En términos sociales, con base en encuestas realizadas, los visitantes de Playa Novillero suelen ser turistas o excursionistas que viajan en grupos familiares o con amigos, con una edad promedio de 38 años, procedentes de localidades cercanas como Tecuala, Rosamorada y Acaponeta, así como de estados vecinos como Jalisco, Sinaloa y Durango (turismo regional). Este turismo se caracteriza por ser recreativo y estacional, con mayor afluencia durante los días santos y horas pico entre las 14:00 y las 16:00 horas. Los motivos principales de su visita suelen ser la tradición familiar, la proximidad del sitio y el tipo de playa (mar seguro).

c) Impactos generados por las prácticas de los visitantes

Durante los días de mayor afluencia, se identificaron algunos efectos negativos del turismo en Playa Novillero. Tres de los problemas principales son:

1. Contaminación por residuos sólidos: La insuficiencia y la ineficiencia de los contenedores de basura, junto con la cultura ambiental de los visitantes, resultan en una acumulación de basura, principalmente inorgánica, que contamina la arena y el mar. Se estima que se generan hasta 175 toneladas de residuos sólidos (considerando de 1 a 3.5 kg por persona de acuerdo con Sarmiento, 2008 citado por Padilla, 2015) en la playa Novillero, que posteriormente se queman, generando contaminación del aire. Para mitigar este problema, se sugiere colocar contenedores temporales señalizados para una adecuada separación y tratamiento de los residuos.

2. Defecación al aire libre: Debido a la falta de baños públicos, los visitantes se ven obligados a hacer sus necesidades fisiológicas en la arena y/o el mar, lo que no solo contamina el ambiente, sino que también puede transmitir enfermedades. Se propone instalar baños públicos temporales para cubrir esta necesidad sin generar un impacto ambiental y económico significativo.

3. Presencia de automóviles y motocicletas en la playa: La circulación de vehículos en la playa, estacionados y en movimiento, genera problemas estéticos y de seguridad. Aunque no hay una prohibición legal en México, se debería regular esta práctica para evitar la contaminación del suelo y acústica, así como los accidentes automovilísticos. Se sugiere prohibir la circulación de vehículos en la playa y proporcionar estacionamientos adecuados como medida correctiva.

Estos impactos varían en magnitud y temporalidad, concentrándose principalmente durante la Semana Santa, con algunas afluencias mínimas regulares durante el resto del año, que aumentan ligeramente en verano, diciembre y días festivos.

d) Capacidad de Carga Turística de playa Novillero

La estimación de la capacidad de carga turística (CCT) según García, de la Calle y Mínguez (2011) implica tres dimensiones: física, social o perceptual, y operativa o de gestión.

e) Capacidad de Carga Física (CCF)

Para calcular la CCF, se considera la cantidad de personas que pueden físicamente estar en un espacio disponible. El modelo de Cifuentes (1992) consta de dividir la superficie total entre el área ocupada por visitante y

multiplicarla por las horas de estancia. Sin embargo, en las playas no es posible controlar el ingreso y el tiempo de permanencia de los turistas (Dias, Körössy y Fragoso, 2012). En este sentido, para la variable tiempo se usó la fórmula simplificada:

$$CCF = S/s.$$

Dónde: S = superficie total del área visitada; s = área ocupada por cada visitante.

De acuerdo con Roig (2003) al ser una oferta de playa con un sector turístico muy estacional y centrado en los meses de verano, como es el caso de Novillero, se rebaja la superficie óptima máxima de 25 m² establecida a 15 m² por usuario (ver Tabla 2).

Tabla 2
Capacidad de carga física estimada para el área en estudio

Capacidad de Carga Física de playa Novillero			
Zona	Superficie	Espacio por visitante (m ²)	CCF (Visitantes)
Restaurantes	16 ha (160 000 m ²)	2	40 000
Intensiva	8.2 ha (82 000 m ²)	15	5466
Ramadas	1 ha (10 000 m ²)	1.8 (9m ² /5 personas)	5556
Libre	5.2 ha (52 000 m ²)	15	3254
Campamento	1.2 ha (12 000 m ²)	1.5 (6m ² /4 personas)	8000
Total	31.6 ha. (316 000 m ²)	35.3	62 276

Fuente: elaboración propia, 2017.

En la zona de restaurantes, es importante considerar que parte del espacio no está disponible para los comensales. Aproximadamente el 30 % se destina al estacionamiento, mientras que otro 20 % se reserva para baños y cocina. Esto deja un área disponible de 80 000 m² para mesas y sillas.

Además, se estima un espacio de 2 m² por persona, lo que, al dividir el área disponible, se obtuvo la CCF señalada en la tabla.

La zona intensiva es muy diversa en cuanto al espacio disponible por persona. Puede ser menos de un metro cuadrado cuando se está disfrutando de un concierto o concurso en el escenario, pero más amplio durante los juegos deportivos y en la playa. Por lo tanto, se ha considerado un espacio promedio de 15m² por persona, como indica Roig (2003).

La zona de ramadas consiste en una franja de construcciones de palma continuas, cada una con una medida de 9 m² que alberga en promedio a 5 personas, lo que resulta en un espacio de 1.8 m² por persona.

En la zona libre, donde se encuentran coches y usuarios, un automóvil promedio ocupa 9 m². Considerando la longitud del polígono del área libre, que es de 851m, se estima que pueden haber alrededor de 355 automóviles en esa área, dejando un espacio disponible en la playa de 52 000 m². Por lo tanto, se estima que hasta 3254 personas pueden estar físicamente en esa zona con un espacio personal de 15 m².

La zona de campamento, que abarca un polígono de 1.2 hectáreas, tendría la capacidad física de albergar 2000 casas de campaña de 6m², con 4 personas en cada tienda.

En Playa Novillero, se estima que pueden estar físicamente hasta 62 276 visitantes por día, teniendo en cuenta diversas zonas y sus características. Si se multiplica este valor por los cuatro días santos, resultan en 249 104 visitantes.

f) Capacidad de Carga Real (CCR)

La capacidad de carga física (CCF) se ve afectada por factores de corrección (FC) que la reducen a capacidad de carga real debido a diversos elementos biológicos, ambientales, sociales y perceptuales, definidos según las características específicas del lugar. Estos factores incluyen aspectos Sociales como nivel de ruido (Aranguren, Moncada, Naveda, Rivas y Lugo, 2008), aspectos perceptuales o psicológicos (López y López, 2007), factores biológicos como la anidación de tortugas y la presencia de medusas en el mar, así como factores físicos (temporada de lluvias y los ciclones

tropicales) que afectan la costa norte de Nayarit (Tabla CCC).

Considerando estos factores, se estimó que el número máximo de visitantes al día es de 5312 personas, de acuerdo con las condiciones observadas durante el estudio (ver Tabla 3).

Tabla 3
Factores de corrección para playa Novillero

Factor de Corrección	Limitantes	Porcentaje del total	Valor (100-FC)/100
Anidación de tortugas	107 días	29.31 %	0.7069
Presencia de Medusas	214 días	58.63 %	0.4137
Temporada de lluvia y riesgo por Ciclones Tropicales	184 días	50.41 %	0.4959
Capacidad de Carga Psicológica	68 personas	17.66 %	0.8234
Ruido permisible	2 días	28.57 %	0.7143

Fuente: elaboración propia, 2017.

g) Capacidad de Carga Efectiva (CCE)

La Capacidad de Carga Efectiva (CCE) se refiere a la capacidad de gestión necesaria para manejar el lugar de manera adecuada. Obtener esta capacidad no es tarea sencilla (Fernández y Bértola, 2014), ya que los datos públicos sobre las variables definidas no son fácilmente accesibles o presentan situaciones diversas. Por lo tanto, para Playa Novillero se tomaron en cuenta algunos de los factores propuestos por estos autores, además de agregar elementos utilizados por Aranguren et al. (2008). (ver Tabla 4).

Tabla 4

Variables consideradas para estimar CCE en el área en estudio

Capacidad de Manejo en playa Novillero					
Ítem		Referencia	Número existente	Número Óptimo	Capacidad de Manejo (%)
Personal	Marina	Secretaría de Marina Armada de México	8	28	29 %
	Cruz Roja	Cruz Roja Mexicana	12	12 a 15	100 %
	Estancias gubernamentales (CONANP, PROFEPA)	Orden Jurídico Nacional	4	5	80 %
	Policía (Municipal y Estatal)	ONU	17	150	11 %
	Protección Civil y Bomberos	Plan de Trabajo de Protección Civil 2016	9	30	30 %
	Tránsito Estatal	Agencia Metropolitana de Tránsito	5	8	62.5 %
	Información turística	SECTUR	0	1	0 %
	Limpieza (voluntarios)	No se encontraron referencias	3	n	100 %
Infraestructura	Hoteles	No se encontraron referencias	5	n	100 %
	Restaurantes	No se encontraron referencias	16	n	100 %

Capacidad de Manejo en playa Novillero					
Ítem		Referencia	Número existente	Número Óptimo	Capacidad de Manejo (%)
Infraestructura	Ramadas	No se encontraron referencias	375	n	100 %
	Campamento	Norma Oficial Mexicana NOM-06-TUR-2009	1	5	20 %
	Duchas	Blue Flag	64	125	51 %
	Baños públicos (solo existentes en restaurantes)	Norma Sanitaria Para El Funcionamiento De Restaurantes Y Servicios Afines Resolución Ministerial N° 363-2005/ Minsa	64	96	67 %
	Módulo de información	SECTUR	1	1	100 %
	Torres salvavidas	Orden Jurídico Nacional	3	9	33 %
Equipamiento	Transporte público	No se encontraron referencias	6	n	100 %

Capacidad de Manejo en playa Novillero					
Ítem		Referencia	Número existente	Número Óptimo	Capacidad de Manejo (%)
Equipamiento	Cestos de basura	Localización Óptima De Contenedores De Residuos Sólidos Urbanos En Alcalá De Henares	4	12	33 %
	Camiones recolectores de basura	EMAS	1	2	50 %

Fuente: elaboración propia.

Teniendo en cuenta estas variables, se estima que la afluencia máxima aceptable es de 3261 visitantes al día, considerando la capacidad de gestión que presenta la zona. Es importante destacar que la Capacidad de Carga Física (CCF) siempre será mayor que la Capacidad de Carga Real (CCR), y la CCR puede ser mayor o igual que la CCE (Cifuentes, 1992). En este sentido, las 3261 personas calculadas como límite de visitas al día (CCE) podrían aumentar hasta 5312 turistas/excursionistas, siempre y cuando la capacidad de gestión alcance un nivel óptimo.

Conclusiones

En este trabajo se aplicó una metodología de estimación de la Capacidad de Carga Turística (CCT), ya clásica y con amplia experiencia, a un espacio costero de gran valor ecológico y alta presión turística temporal. En términos generales, la investigación destaca cómo la capacidad de carga es una estimación dinámica y compleja, y cómo la adaptabilidad de esta metodología permite ajustar las fases según las necesidades de los sitios evaluados.

Con relación al área analizada, se concluye que la demanda de visitantes supera el límite de 3261 personas al día establecido en este estudio. Las

presiones ambientales son puntuales y temporales, especialmente en términos de contaminación. Sin embargo, dado que el turismo se concentra principalmente durante el periodo vacacional de Semana Santa, se estima que el ecosistema costero tiene la capacidad de resiliencia para absorber el impacto.

Por otro lado, la satisfacción del turista y excursionista, determinada mediante la capacidad de carga psicológica, difiere del modelo introducido por Alldredge (1972, en Roig, 2003), el cual sugiere que la satisfacción disminuye a medida que aumenta el número de visitantes. Las encuestas aplicadas revelaron que la masificación de personas en la playa no es un inconveniente para la mayoría de los visitantes; solo un 18 % manifestó sentirse incómodo por la cantidad de personas.

La estimación de la capacidad de carga turística en Playa Novillero, realizada mediante una metodología específica adaptada para este estudio, proporciona un respaldo para gestionar políticas adecuadas de administración tanto del recurso natural como humano. La investigación señala que los indicadores más débiles se encuentran en la capacidad de manejo, especialmente en los servicios sanitarios y de seguridad, donde se deben tomar medidas inmediatas para reducir los impactos durante las próximas fechas vacacionales, lo que permitiría aspirar a una actividad turística sostenible.

Considerando los resultados obtenidos, se podría prescindir de las condiciones actuales del área de estudio y establecer una situación ideal hipotética donde se pueda incrementar el límite de 3261 visitantes al día a 5312, siguiendo algunas recomendaciones:

1. Colocar contenedores de basura a una distancia máxima de 200 metros en toda la playa, debidamente señalizados para el posterior tratamiento de los residuos.
2. Instalar baños móviles temporales (únicamente durante el periodo de Semana Santa) en las zonas carentes de dicho servicio.
3. Abastecer con servicios básicos todos los campamentos.
4. Disminuir al menos dos decibeles el ruido generado para cumplir con la normativa.
5. Regularizar la circulación de vehículos motorizados en la playa.
6. Promover el ordenamiento ecológico del territorio.
7. Impulsar el plan de desarrollo urbano turístico de Playa Novillero.

Con estas propuestas y una evaluación constante de la capacidad de carga turística en Playa Novillero, se podría gestionar un mejor funcionamiento del sitio turístico, ofreciendo un servicio de calidad para mejorar la satisfacción de la experiencia del visitante y contar con herramientas para una planificación sostenible de futuros desarrollos turísticos en el área, priorizando ante todo la conservación del ambiente.

Referencias bibliográficas

- Aranguren, J., Moncada, J., Naveda, J., Rivas, D. y Lugo, C. (2008). Evaluación de la capacidad de carga turística en la playa Conomita, municipio Guanta, estado Anzoátegui. *Revista de Investigación* No. 64, pp. 31 – 61.
- Buckley, R. (2011). Tourism and Environment. *Annual Review of Environment and Resources*. 36, no. 1. 397–416.
- Chávez, Dagostino, R.M. (2022). La capacidad de carga turística. ¿Una herramienta para el turismo sustentable? *MEROPE* año 04, Num. especial 03. file:///Users/ongo/Downloads/Merope_esp3_Art2_Capacidad+de+Carga+..%20(1).pdf
- Cifuentes, M (1992). *Determinación de Capacidad de Carga Turística en Áreas Protegidas. Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza CATIE. Costa Rica.*
- Cifuentes, M. (1996). *Determinación de la capacidad de carga turística en los sitios de visita del Parque Nacional Galápagos.* Servicio P.N.G. Ecuador.
- García Hernández, M (2003). *Turismo y conjuntos monumentales. Capacidad de acogida turística y gestión de flujos de visitantes.* Valencia. Tirant lo Blanch. 546 pp.
- García, M. y de la Calle, M. (2012). Capacidad de carga en grandes recursos turístico-culturales. *Anales de Geografía* 2012, vol. 32, núm. 2 pp.253-274.
- García, M., de la Calle, M. y Mínguez, M. (2011). Capacidad de carga turística y espacios patrimoniales, aproximación a la estimación de la capacidad de carga del conjunto arqueológico de Carmona (Sevilla, España). *Boletín de la Asociación de Geógrafos Españoles. No.57*, pp. 219-241.
- INEGI (2018). *Censo Económico, Sistema Automatizado de Información Censal (SAIC).*
- INEGI (2020) *Censos y Conteos de Población y Vivienda. Principales resultados por localidad (ITER) del Censo de Población y Vivienda 2020.* Datos oportunos.

- Moore, A. (1993). *Manual para la capacitación del personal de áreas naturales protegidas*. Washington, D.C.: US National Parks Service.
- Morant, M. y Viñals, M. (2008). La capacidad de carga recreativa en la gestión de los visitantes: El caso del parque natural del carrascal de la Font Roja (Alicante, España). *Revista de Análisis Turístico*, n° 5, 1er semestre 2008, pp. 66-74.
- OMT (1995). Conceptos, definiciones y clasificaciones de las estadísticas del turismo. *Manual Técnico no. 1*. Capítulo 3. 21-38 pp.
- Organización Mundial de Turismo (1991). *Conferencia Internacional de Estadísticas de Turismo y Viajes*. Ottawa, Canadá.
- Ortiz, A. (2006). *Diagnóstico integral de los impactos producidos por la industria del turismo en Baja California Sur, México* (Tesis de Maestría). Centro de Investigaciones Biológicas de Noroeste, S. C., La Paz, México.
- Padilla, N. (2015). The environmental effects of Tourism in Cancun, Mexico. *International Journal of Environmental Sciences*. Volume 6, No 1. 1 -13 pp.
- Ramos, A., Valenzuela S., Schneider, G. (2023). Determinación de la capacidad de carga física en el sendero recreativo “Las Ánimas” en la ciudad de Tandil, Argentina. *Gran Tour: Revista de Investigaciones Turísticas n° 28* julio-diciembre de 2023, pp. 3-20. <https://eutm.es/grantour/index.php/grantour/article/view/327/114>
- Roig, I Munar, F.X. (2003). Análisis de la relación entre capacidad de carga física y capacidad de carga perceptual en playas naturales de la Isla de Menorca. *Investigaciones Geográficas*, No. 31, 2003; pp.107-118.
- Shelby, B. y Herberlein, T. (1986). *Carrying capacity in recreation settings, Oregon*. Oregon State University Press.
- Troitiño, Brandis, del Río, Gutiérrez, de la Calle y García (1999). Estudio previo para la revisión del plan especial de la Alhambra Y Aljares. Volumen II. Capítulo IV: *Flujos turísticos y capacidad de acogida de la Alhambra*. pág. 1 - 161
- UAN (2002). *Ordenamiento Ecológico Territorial de la Barra Novillero, Nayarit*.
- Vasconcelos, S., DrummondCámara, C. y Batista, J. (2012). Evaluación de La Capacidad de Carga Física Del Parque Municipal de Itiquira, Formosa (GO), Brasil. *Estudios Y Perspectivas En Turismo 21*, no. 4. 996–1012.
- Zelenka, J. y Kacetl, J. (2012). *The Concept of Carrying Capacity in Tourism*. Amfiteatru Economic.

Capítulo 1.3

Sostenibilidad y riesgos de contaminación en cuerpos de agua: el caso de las extracciones clandestinas de hidrocarburos en Tala, Jalisco

Juan Manuel Sandoval-Hernández¹

Christian René Escudero Ayala²

Edith Xio Mara García-García³

<https://doi.org/10.61728/AE24004268>



¹ Estudiante del Doctorado en Geología, adscrito al Departamento de Estudios del Agua y la Energía, del Centro Universitario de Tonalá de la Universidad de Guadalajara. *e-mail:* juan.sandoval5593@alumnos.udg.mx

² Profesor Investigador del Centro Universitario de la Costa de la Universidad de Guadalajara. *e-mail:* christian.escudero@academicos.udg.mx

³ Profesora Investigadora del Departamento de Estudios del Agua y la Energía del Centro Universitario de Tonalá de la Universidad de Guadalajara. *e-mail:* xio.garcia@academicos.udg.mx

Introducción

El desarrollo económico mundial, la producción industrial, los servicios y suministros para la sociedad e incluso la vida misma en este planeta que habitamos depende de los recursos naturales (Solórzano Chamorro et al., 2022, p. 211) y son considerados como un factor de riqueza de los países. El agua a nivel mundial es un recurso natural indispensable para la vida del ser humano, está almacenada en cuerpos de agua, que son extensiones de agua que pueden estar en estado líquido o sólido sobre la superficie terrestre o el subsuelo. Estos pueden ser naturales o artificiales (CONAGUA, 2017). Del total de agua disponible a nivel mundial el 97 % es agua salada, por lo tanto, el 3 % restante es dulce. De esta última el 79 % está en estado sólido en forma de hielo, el 20 % se agua subterráneas, y tan solo el 1 % es agua superficial (Felice Uricchio et al., 2023, p. 19; Peña García et al., 2012, p. 4). Específicamente, el porcentaje de agua subterránea es una reserva, que abastece gran parte de las poblaciones como agua potable y permite el desarrollo económico del país. Centrarse en el agua como un bien común global es fundamental para repensar sus valores y la economía del agua.

De acuerdo con el reporte global del agua por la revista Acciones de Divulgación del Conocimiento (*Disclosure Insight Action*) CDP en el Reporte Global del Agua 2023, debemos ayudar a lograr un futuro con mayor seguridad hídrica, uno con mayores oportunidades económicas para todos, mayor equidad de acceso, sostenibilidad de uso, desaceleración de la pérdida de biodiversidad y mitigación de los impactos del cambio climático (Le Sève y De Souza, 2024) por lo que debe considerarse como reserva estratégica para disminuir el riesgo de contaminación y sobre explotación.

En varios países de América Latina y el Caribe los Recursos Naturales No Renovables (RNNR) constituyen una fuente de ingresos fiscales tributarios (regalías, impuesto sobre la renta, otros impuestos a los ingresos y otros gravámenes). Uno de los principales RNNR es el hidrocarburo, que según datos de la CEPALSTAT tan solo el aprovechamiento del mismo como una fuente de ingresos fiscales en México representó en 2017 el

5 % del PIB, lo que equivale a una participación relativa del 28 % de los RNNR en los ingresos totales. Sin embargo, los RNNR son limitados y el flujo de ingresos que generan son altamente volátiles, ya que sus precios se fijan en los mercados internacionales. Por lo que es importante considerar en la gestión de RNNR la equidad intergeneracional, garantizando que su agotamiento no comprometa ni restrinja las oportunidades de las generaciones futuras, así como la sostenibilidad medioambiental (OECD, 2020, p. 74).

El desarrollo sostenible o sustentable, según la Organización Naciones Unidas (ONU) es “Aquel que cubre las carencias de las generaciones presentes sin poner en riesgo los requerimientos y bienestar de las generaciones”, definido en el informe *Our common future* (nuestro futuro común) (ONU, 1987). Otra connotación de la definición es que la sostenibilidad proviene de la ecología, lo que implica que su definición esté soportada en los problemas ambientales ocasionados por la alteración de los ciclos de la naturaleza generados por las acciones antrópicas que amenazan la sustentabilidad (González Pérez et al., 2023, p. 78).

Mientras que generalmente, los países con poco desarrollo económico derrochan sus recursos naturales, los desarrollados preservan de manera positiva sus recursos, distinguiéndose principalmente por la industrialización e innovación derivada de inversión en investigación, que fomenta el desarrollo de avances tecnológicos aplicados en la transformación y transporte de recursos naturales renovables y no renovables generando menor contaminación al medioambiente (Gómez-López et al., 2011).

La globalización mundial provocada por el comercio transfronterizo de bienes, servicios, tecnología, flujos de inversión e información, creó la necesidad de coordinación entre países en el proceso de producción y venta de piezas fabricadas en diversas partes del mundo. Lo anterior propició una nueva forma de expansión industrial por las diversas entidades federativas de los países y con ello necesidades de suministro de servicios con infraestructura industrial competitiva. Por lo que, las cadenas de suministro global son la forma de producción característica de la globalización, actualmente representa el 80 % del comercio mundial dirigido por empresas multinacionales especialmente en la manufactura (Kolb, 2021). Es por ello que, en esta forma de producción globalizada, cada país o industria se especializa en lo que tiene ventaja competitiva (mejor produce) esto es,

produce con menor cantidad de recursos, costos, mayor eficiencia, e igual calidad. Por lo que, las industrias en cada país promueven el crecimiento económico y finalmente reducen los precios de los bienes y servicios para los hogares haciéndolos más asequibles.

Por lo tanto, el desarrollo económico derivado de la industrialización generalmente en las urbes, demanda disponibilidad y eficiente del suministro de servicios de energía. Uno de los principales recursos naturales en los procesos de manufactura para el abastecimiento de insumos son los derivados de hidrocarburos. El costo de la energía juega uno de los factores determinantes en la competitividad. Lo que ha provocado el desarrollo mundial de infraestructura para transportar petróleo, sus derivados y otros químicos.

La demanda de hidrocarburos creció principalmente debido al desarrollo industrial. El uso del petróleo se divide en dos áreas básicas: energético y como materia prima. Para el primero, destaca su uso para generar energía en la industria, gasolineras, producción de electricidad, transporte, y uso doméstico. En tanto para el segundo, materia prima para las industrias: farmacéutica y fertilizantes, plásticos, pinturas y solventes, producción de aromáticos, fibras sintéticas, además de, combustibles y lubricantes (Orozco Carbajal, 2011, p. 4). Debido a lo anterior el petróleo es un RNNR indispensable en la vida actual. La industria de extracción petrolera puede estar ubicada en plataformas marítimas o tierra, debido a esto, los principales medios de transporte masivo son por barco, ferrocarril y/o autotankers respectivamente. Sin embargo, para eficientar el transporte de hidrocarburos tanto desde plataformas marítimas como por tierra se desarrolló infraestructura por ductos.

El primer ducto considerado moderno se construyó hace 400 años 1617 en Bavaria, Alemania, con longitud de 31 km, la principal característica fue el uso de bombas para impulsar el producto por bombas con ruedas hidráulicas, utilizado para el transporte de sal (Celovic, 2019). Actualmente los ductos más importantes a nivel mundial por la capacidad de transporte de hidrocarburos y su longitud a nivel mundial son: Oleoducto Druzhba, con 8900 kilómetros de tuberías desde Rusia, pasando por Polonia, Lituania, Letonia, Alemania, Hungría, Eslovaquia, Ucrania y República Checa, operando desde 1964, actualmente este oleoducto transporta el 40 % del petróleo de las importaciones netas europeas (Katyukha y Mottaeva, 2021,

p. 6). En Estados Unidos, hay más de 370 000 kilómetros de oleoductos interestatales e intraestatales (Emanuel et al., 2021, p. 3).

En México, entró en operación la infraestructura del primer oleoducto entre Veracruz y la capital mexicana en 1930 para la empresa El Águila de capital angloholandés de la refinería Azcapotzalco en la Ciudad de México (de los Reyes, 2022). Actualmente, Petróleos Mexicanos (PEMEX) tiene una infraestructura extensa de oleoductos y poliductos para transportar sus productos, entre áreas de extracción petrolera, refinerías, petroquímicas, y estaciones para su compresión, bombeo, procesamiento, almacenamiento y distribución. Los poliductos por su parte transportan combustibles ya procesados, como gasolinas y diésel (Llano y Flores, 2017, p. 2) por el territorio mexicano (Figura 1). La última cifra detallada en rueda de prensa por el gobierno de México informó de una longitud total de ductos de la infraestructura PEMEX Logística en territorio mexicano es de 17 765.2 km (acueductos 7.9; combustoleoductos 144.6; gas LP 1,583; oleoductos 5216; poliductos 8385.8; petroquímicos 1982.2; quimioductos 364.3; turbosinoductos 81.2) y 9167.6 km para gas natural (CENEGAS) (López Obrador, 2020, p. 9).

Figura 1

Imagen de distribución de infraestructura para el transporte de Hidrocarburos en México, oleoductos 10 006.53 km, poliductos 9098.53 km



OLEODUCTOS Y POLIDUCTOS

Fuente: Llano y Flores, 2017.

Para satisfacer la demanda debida al incremento de plantas industriales hubo la necesidad construir ductos para transportar grandes volúmenes de crudo y sus derivados. Los oleoductos para el transporte de crudo, gasoductos, para el transporte de gas; combusteoloductos, para combustóleo pesado derivados del petróleo crudo; poliductos, para destilados de gasolina y diesel; y petroquímicos, como el etano, butano, propano, etc. De acuerdo con el informe en rueda de prensa de PEMEX Logística, el volumen transportado de hidrocarburos en poliductos fue de 817 000.00 barriles promedio por día en 2019, lo que equivale a 128 677 500.00 litros por día. Mientras que, el plan para el 2020 fue incrementar a 950 000 barriles por día. Además, se puso como meta la expansión de la red de poliductos para transportar hidrocarburos: Tula-Toluca, San Martín-Puebla, Minatitlán-Salina Cruz, Matamoros-Cadereyta, Minatitlán-México, que representa un incremento de 1045 km de infraestructura de transporte de hidrocarburos por ducto en México (López Obrador, 2020, p. 31).

El precio por kilómetro recorrido para transportar una tonelada de gasolina, vía pipa es de 1.08 pesos, tren 0.48 centavos, barco 0.15 centavos, mientras que por ducto 0.08 centavos, según informe de GasGas Analytics (Bernal Avendaño, 2020; Herrera, 2020), de lo que se puede deducir que la alternativa más económica es el transporte por ducto. Sin embargo, la estimación del precio final de la gasolina al consumidor depende además del medio de transporte, del Costo Trasladable por Pérdidas no Operativas (CTPNO) según resolución para trasladar las pérdidas derivadas por el robo de hidrocarburos en el transporte por ducto a los usuarios del sistema, resolución RES/064/2022 de la Comisión Reguladora de Energía (CRE) y calculado en la resolución RES/164/2022 por PEMEX logística, que va desde 0.004 hasta 0.211 pesos/litro dependiendo de la zona del sistema de transporte por ducto de petrolíferos (CRE, 2022, p. 39).

A pesar del CTPNO aplicado al transporte de hidrocarburos por ductos, este medio de transporte representa el menor costo y riesgo de seguridad a la ciudadanía durante el transporte de material altamente inflamable, comparado con el transporte por carreteras mediante pipas y por tren en vías férreas. Lo que hace a este medio de transporte el más eficiente y económico en la distribución y abastecimiento de refinerías y centros de almacenamiento. Para ello, si la infraestructura de transporte de hidrocarburos por ductos de PEMEX, se opera y mantiene con los valores de

sustentabilidad, rentabilidad, excelencia operativa, disponibilidad de activos, mantenibilidad y confiabilidad que alude la petrolera (López Obrador, 2020, p. 14), será un medio de transporte eficiente, sin contaminar la atmósfera, modifican la ecología, evitando contaminación de suelo, accidentes y daños ecológicos marinos debido al transporte carretero, ferrocarril y buques. Por lo que la infraestructura de transporte de hidrocarburos por ductos favorece la sostenibilidad ambiental, minimiza riesgos de accidentes y desastres ecológicos. Ya que, los sistemas de transporte de hidrocarburo por ductos modernos cuentan con sistemas de software de administración de información, indicadores seguridad y tecnologías modernas que muestran información de transmisores de presión y controlan válvulas de cierre automático con el objetivo de aislar fugas (López Obrador, 2020, p. 14), disminuyen costos de remediación e impacto ambiental. Se considera contaminación de suelo por fuga al proceso ocurrido en el transporte de hidrocarburos a través de la red de ductos (Álvarez-Manilla Aceves et al., 2002, p. 10).

El Diario Oficial de la Federación (DOF) establece las disposiciones de carácter general, los lineamientos en materia de Seguridad Industrial, Seguridad Operativa y Protección al Medio Ambiente, para el transporte terrestre por medio de Ductos de Petróleo, Petrolíferos y Petroquímicos. Así, en el Capítulo I, establece las disposiciones generales. En el Capítulo II establece las condiciones de diseño de los ductos, sobre saliendo para este caso de estudio el Artículo 24 que establece que se debe implementar sistemas de protección y/o control de corrosión, para evitar fugas, el Capítulo III establece los procedimientos de construcción, destacando para este caso los procedimientos en materia de impacto y riesgo ambiental, tipo de tubos, accesorios, conexiones, manejo, soldadura, inspecciones, pruebas y criterios. Además, establece las franjas de seguridad conforme a diámetro de los ductos, distancia a las diversas vías de comunicación carreteras y zonas urbanas.

En el Artículo 36 se establece la profundidad mínima de ductos enterrados, para el caso de ductos de petróleo, petrolíferos (excepto Gas L.P.) y petroquímicos que, dependiendo del uso de suelo, condiciones hidrológicas, tipo de rocas, entre otras debe ser de 0.60 a 1.20 metros. También obliga al señalamiento, que advierta del peligro de cavar, así como señale teléfonos para reportar daños. De la misma manera el Capítulo IV esta-

blece la forma de evaluar el prearranque de la infraestructura, en su caso el Capítulo V establece los lineamientos de operación y mantenimiento, donde destaca en el Artículo 80 el establecimiento de un programa de patrullaje que entre otras obligaciones debe observar condiciones inseguras como tomas clandestinas del producto. En el Capítulo VI establece como se debe administrar la integridad de los ductos destacando que deben identificar las amenazas potenciales, entre ellas menciona corrosión, daños mecánicos, defectos de fabricación, fallas operativas, entre otras. Así como, consecuencias a las instalaciones, personal operativo, población y al medioambiente. El Capítulo VII establece procedimientos para desactivar o suspender temporalmente la operación de los ductos, para en el Capítulo VIII establecer los lineamientos de reactivación. Sin olvidar, en el Capítulo IX los procedimientos ante la necesidad de cierre, desmantelamiento y abandono de la infraestructura (DOF, 2017). En tanto, en el Anexo III, establece métodos y procedimientos de detección de fugas y/o derrames de Petróleo, Petrolíferos y Petroquímicos, en el suelo y debajo de la superficie del suelo. Señala que, los métodos que podrían identificar fugas en el subsuelo son Inspección visual de la vegetación, ultrasonido, fibra óptica, diferenciales de presión y flujo, burbujeo, termografía infrarroja terrestre o aérea y perros adiestrados.

Si además de lo anterior, la calidad de las políticas públicas e instituciones a la vez que estimulan el crecimiento económico pueden proteger el medioambiente y neutralizar los efectos del crecimiento económico de modo sostenible, se reflejarán en las decisiones sociales de los bienes ambientales públicos relativos a la disponibilidad y protección de los recursos naturales. Panayotou en el 2000 citado por Gómez-López (2011) considera cinco indicadores de calidad institucional en general: a) respeto y enduramiento de los contratos, b) eficacia de la burocracia, c) eficiencia de las leyes, d) corrupción en el gobierno y e) riesgo de apropiación, por lo que si las instituciones cuentan con derechos de propiedad sólidos aportan una base legal en la toma de acciones entre quienes generan contaminación y degradan el valor de la propiedad (Gómez-López et al., 2011), la calidad de las políticas contribuirá a la sostenibilidad del medioambiente.

Sobre la red de poliductos de PEMEX se ha provocado sitios contaminados por hidrocarburos, definido por SEMARNAT como un “Lugar, espacio, suelo, cuerpo de agua, instalación o cualquier combinación de

estos que ha sido contaminado con materiales o residuos que, por sus cantidades y características, pueden representar un riesgo para la salud humana, a los organismos vivos y el aprovechamiento de los bienes o propiedades de las personas” (SEMARNAT, 2020). Para este caso de estudio, el agente contaminador son los derivados de hidrocarburo, en específico los hidrocarburos aromáticos BTEX, que son productos químicos orgánicos procesados (gasolinas), compuestos por el grupo del Benceno, Tolueno, Etilbenceno, Xileno (BTEX). De los químicos antes mencionados la gasolina estándar contiene aproximadamente el 18 % del peso de la mezcla (Frago, 1993, p. 7; Reyes, 2021, pp. 128–129).

A pesar de que los poliductos son el medio de transporte de hidrocarburos más sostenible en condiciones de operación controladas, se ha puesto en riesgo la salud pública por contaminación de hidrocarburos, principalmente por el benceno que puede infiltrarse en el cuerpo a través de los pulmones por evaporación, la piel al contacto con el agua o al pasar al tracto gastrointestinal por medio de alimentos y bebidas producidas con agua contaminada (ATSDR, 1995; García y Fernández, 2014). El principal factor de contaminación de cuerpos de agua y peligro de explosión a la sociedad sobre la infraestructura de poliductos de PEMEX en México, son las extracciones clandestinas de gasolina de los poliductos, situación que ha repercutido negativamente en subsuelos que por sus características geológicas de permeabilidad favorecen la infiltración al manto freático contaminado acuíferos cuando está cerca de la superficie, de acuerdo con el Informe de Situación del Medio Ambiente en México 2012 (Álvarez-Manilla Aceves et al., 2002, p. 1; SEMARNAT, 2013a).

El fenómeno de huachicol es la actividad ilícita que se ha desarrollado sobre los ductos, por lo que, el huachicolero es una persona “delincuente que se dedica a robar gasolina perforando los oleoductos que la conducen” (Peinado, 2019, p. 1). El huachicol genera un golpe ambiental, repercutiendo generalmente en terrenos de cultivo, impactando directamente en el subsuelo y si las condiciones son favorables alcanza las aguas subterráneas utilizada para abastecer agua potable, provocando un problema de salud pública según análisis por la Universidad Iberoamericana de Puebla que argumenta: “Una vez que abren o perforan los ductos hay un derrame de cualquier índole, y aunque a lo mejor no es de gran escala, sí son constantes. Entonces el daño va contaminando los suelos aledaños que, en

muchos lugares del llamado Triángulo Rojo, los ductos pasan cerca o muy cerca de zonas de cultivo que son afectadas severamente por esta derrama de hidrocarburo” (León y Nacar Jonathan, 2017, p. 14).

En México la ubicación de los ductos, características y las tomas clandestinas son reservadas parcialmente ya que se consideran de seguridad nacional por lo que solo se tiene acceso a información del año 2000 al 2018. Según acuerdo CT 10.18.O.18 (CT_PEMEX, 2018). Sin embargo, en rueda de prensa el Gobierno de México, informó: de enero a julio de 2020, Petróleos Mexicanos (Pemex) reportó 5805 tomas clandestinas en sus ductos con un total de 16 121 perforaciones ilegales, según la Gerencia de Estrategia y Sistemas de Seguridad y Monitoreo (Herrera, 2020). El Programa Nacional de Remediación de Sitios Contaminados 2021-2024 informó que, para diciembre del 2018, la Comisión Nacional del Agua identificó 40 sitios con aguas subterráneas contaminadas, de los cuales 32 se concluyó que su contaminación fue por tomas clandestina en ducto (SEMARNAT, 2021).

En tanto, las tomas clandestinas en Jalisco en el año 2020 representan el 1.07 % a nivel nacional. Esto es, de los 3 ductos, el León–Aguascalientes, Cactus–Guadalajara, y Salamanca–Guadalajara. En Tlajomulco se registraron 124, Zapotlanejo 55, Tala 47, Zapopan 27, Atotonilco el Alto 42, Ayotlán 15, Lagos de Moreno 38, El Arenal 13, Encarnación de Días 21, Tototlán 10, Degollado 7, El Salto 6, Unión de San Antonio 4, Tonalá 2 y San Juan de los Lagos 1 (Gobierno de México, 2020).

Ya que existen diferentes situaciones de las que se puede derivar contaminación por fuga de hidrocarburos en poliductos como las provocadas por corrosión y fallas del material, en este estudio se aborda el caso de las fugas en poliductos con las siguientes características:

- 1) El punto de contaminación es reportado por la ciudadanía debido a la observación y olor a hidrocarburos sobre pozos de aprovechamiento o afluentes donde confluyen flujos de agua subterránea.
- 2) No se conoce la ubicación geográfica de la fuente de contaminación;
- 3) Existe un desconocimiento de cantidad de contaminante y tiempo en el que ocurrió la contaminación.
- 4) Contaminación histórica no visible, por lo que no se pueden aplicar métodos de evaluación establecidos por la norma oficial (DOF, 2017).
- 5) Las líneas de poliductos que transportan hidrocarburos están dentro de la cuenca del punto de contaminación observado.

6) Se tiene conocimiento de que la contaminación buscada en el subsuelo se pudo haber iniciado a profundidad mayor a 1.2 m (poliductos enterrados), lo que hace inviable las metodologías de muestreo de sedimentos y el respectivo análisis químicos establecidos por la NOM-138-SEMARNAT/SSA1-2012 para determinar el tipo y grado de contaminación (SEMARNAT, 2013b).

La importancia de este caso de estudio es desarrollar mecanismo para delimitar el área o microcuenca hidrológica de investigación donde puede estar alojada la fuente de contaminación por hidrocarburos. Así sobre esta cuenca y mediante métodos de prospección geofísica determinar anomalías encajadas en suelos naturales que puedan asociarse al agente contaminante en el subsuelo como un principio para lograr la caracterización de sitios contaminados por hidrocarburos de manera alterna inicial, y aunque esta fuera del alcance de esta investigación, para después sobre el área de contaminación aplicar categóricamente los métodos oficiales establecidos por las normas (DOF, 2003).

Finalmente, con lo anterior favorecer la sustentabilidad ambiental de aguas subterráneas en los sitios por donde se transportan los químicos energéticos, lo que permitirá aportar conocimiento sobre la ubicación del contaminante y su comportamiento en el subsuelo. Una vez determinado el sitio tener bases sólidas para declarar la zona como pasivo ambiental para proceder a su remediación. Lo que dará paso a la remediación de sitios identificados que favorezcan la condición de coexistencia armónica entre el desarrollo económico, producción de bienes, servicios y su ambiente (Frecè y Harder, 2018, p. 184) dicho de otra manera, se favorecerá sostenibilidad ambiental.

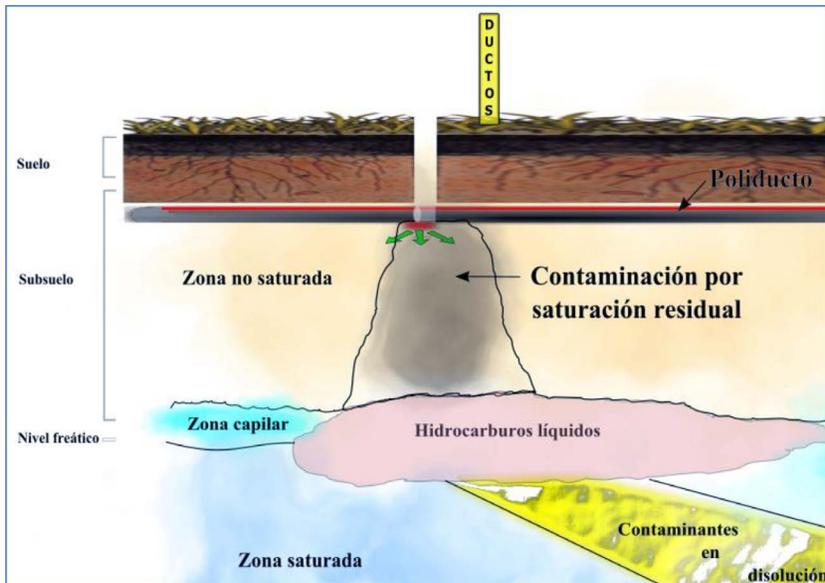
Las anomalías encajonantes (contaminación) en suelos naturales no contaminados pueden ser determinadas con métodos geofísicos sensibles a los procesos químicos, físicos, mecánicos y biológicos que surgen en la interacción de subsuelo con el agente contaminante por tiempos prolongados mayor 6 meses (Hanesch y Scholger, 2002).

El modelo conceptual de infiltración en el subsuelo (Castro, 2007, p. 38) debido a la contaminación por fuga de hidrocarburo por disposición clandestina de poliductos, presenta un proceso desplazamiento vertical ya que, ocurre directamente en el subsuelo a partir de la profundidad de los ductos (generalmente de entre 0.6 y 1.2 m), donde se inician los procesos

de acumulación adheridos por contaminación residual, hasta llegar a la zona capilar justo antes del nivel freático, donde se dispersan y se procede a la difusión, generando la zona de disolución, lixiviación y transporte del contaminante en dirección del flujo de agua subterránea. Mientras que, la zona de hidrocarburos líquidos insolubles, de metales pesados, pueden generar vapor (Figura 2).

Figura 2

Modelo conceptual de fuga en poliducto en el subsuelo, infiltración del contaminante, y procesos químicos

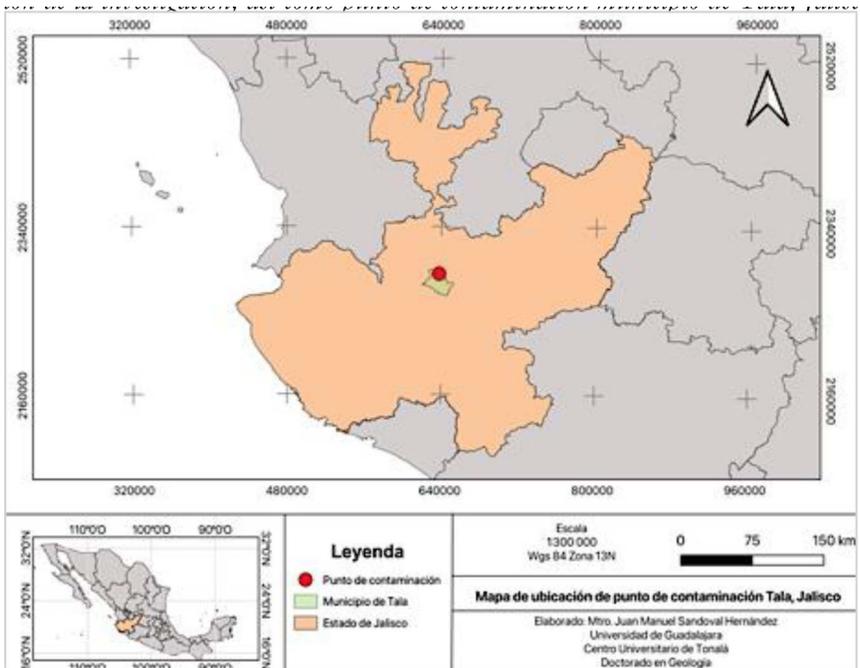


Fuente: Elaboración propia, con base en información de Castro Varela, 2007.

En el subsuelo se inicia la saturación residual del agente contaminante, es en esta zona en forma de cono donde inician los procesos de cambio físicos, químicos y biológicos debido a la interacción entre sedimentos y el fluido contaminante, esta interacción por tiempos prolongados transforma las propiedades características del suelo natural durante el proceso de oxidación (Hanesch y Scholger, 2002). La contaminación surge cuando la cantidad de hidrocarburos en el suelo natural es mayor a la capacidad de degradación de los microorganismos presentes, responsables de oxidar y mineralizar a sustancias inocuas el contaminante (Castro, 2007, p. 13).

En este estudio se aborda el caso en Jalisco, donde la Unidad Municipal de Protección Civil de Tala reportó el 13 de octubre de 2021 a la Unidad Estatal de Protección Civil y Bomberos de Jalisco (UEPCBJ), la presencia de sustancias químicas en el afluente del río El Salado en el Centro Acuático Recreativo (CAR) conocido como “El Chorro” en Tala, Jalisco. En visita de campo en abril de 2022, se identificó el punto de contaminación en las coordenadas 20.707622, -103.676577 en los límites del municipio de Tala y el Arenal Jalisco, ubicado en el centro poniente del estado de Jalisco, sobre la carretera federal 70, kilómetro 5.5 Guadalajara-Ameca, en el Centro Acuático Recreativo “Los Choros de Tala”, constatando olor a hidrocarburos, además de presencia de espejo aceitoso sobre la poza del nivel base de caída de agua de la cascada (Figura 3).

Figura 3
 Mapa de ubicación de la investigación, así como punto de contaminación municipio de Tala, Jalisco, México



Fuente: Elaboración propia, 2024.

Las acciones previas realizadas por instituciones como UEPCBJ, el Sistema Intermunicipal de los Servicios de Agua (SIAPA), Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), Petróleos Mexicanos (PEMEX), Organismo Público Descentralizado Bosque La Primavera (OPDBLP), Comisión Estatal del Agua (CEA) y H. Ayuntamiento Tala, que realizaron en el ámbito de sus funciones. En la inspección se identificó en el afluente olor a gasolina, observándose espejo de agua aceitosa presuntamente gasolina emanando en bajas proporciones de entre las fracturas de las rocas de la cascada vertiéndose al afluente (Figura 4).

Figura 4

Río el Salado, donde se registra el punto de contaminación emanando al afluente



Fuente: Elaboración propia, 2024.

En los recorridos de inspección a empresas aledañas, tomas clandestinas resientes, mediciones de los niveles de explosividad baja por sus siglas en inglés Low Explosive Level (LEL), temperatura, conductividad, Potencial de Hidrógeno (pH), Oxígeno disuelto in situ para determinar compuestos orgánicos volátiles, Hidrocarburos Totales del Petróleo (HTP) y compuestos orgánicos semi-volátiles. De lo que se obtuvo explosividad variante de entre 3 % y 55 % LEL, con máximos por mes de 35 % octubre, 50 % noviembre y 55 % diciembre del 2021, llegando a 0 % para enero y febrero del 2022 (Figura 5).

Figura 5

Gráfica de registro LEL, del periodo del 13 de octubre del 2021 al 4 de enero de 2022



Fuente: Elaboración propia con base a informe UEPCBJ, 2022.

Otra de las acciones en conjunto con PEMEX fue la revisión de segmento de poliducto (Salamanca- Guadalajara identificado como tramo Castillo-Zapopan) entre los kilómetros preliminares 315+500 y 317+500 con reporte reciente de fugas de hidrocarburos por tomas clandestinas, no se encontró derrame.

Metodología

El proceso metodológico de esta investigación parte de los resultados de análisis de laboratorio que confirman la presencia de hidrocarburos del grupo aromático, pero se desconoce la ubicación de la fuente de contaminación, de acuerdo con información proporcionada por UEPCBJ, por lo que se aplicaron metodologías como la entrevista, análisis cartográfico con Sistemas de Información Geográfica (SIG) del punto de contaminación, ubicación de infraestructura de poliductos, reportes de tomas clandestinas. Además del análisis de la red hidrológica, geohidrología, altimetría, geología, para determinar el área de investigación. La investigación documental sobre los procesos físicos y químicos producidos por la interacción del contaminante por tiempos prolongados en subsuelo natural, ayudó a determinar como método de prospección la magnetometría y cómo método

de exploración la resistividad eléctrica, ambos sensibles a los cambios en las propiedades físicas y mecánicas del suelo natural debidas a la oxidación.

La metodología de entrevistas cualitativas no estructuradas (Russell Bernard, 2011, p. 156), favorecieron improvisar las preguntas pertinentes, con base en las observaciones in situ durante el trabajo de campo, hasta profundizar en detalles; por lo que, se obtuvo mayor información del fenómeno en su tiempo de auge observado por la sociedad respecto a las tomas clandestinas y la contaminación desde la perspectiva de ciudadanos e institución UEPCBJ; como: problemática, antecedentes, comportamiento observado, posibles fuentes y causas.

Las metodologías SIG, permiten el análisis geoespacial al integrar mediante capas vectoriales georreferenciadas todo tipo de información conocida sobre el área de estudio (Longley et al., 2015), para dar soporte el proceso de conocimiento de la investigación. La información base utilizada procede de fuentes instituciones especializadas en las áreas de geografía, hidrología, meteorología, Modelo Digitales de Elevación (DEM), infraestructura e información poblacional estadística. Con la información integrada en el sistema SIG, se calculó mediante módulo SWAT subcuencas, altimetría, áreas, longitudes y ubicar puntos referenciados. Finalmente, permitió el análisis de resultados integrando capas de resultados de los procesos metodológicos de datos obtenidos.

Una vez definida el área de estudio, mediante la exploración de base de datos publicada por Llano y Flore, 2017 que contiene ubicación georreferenciada de los reportes de tomas clandestinas en el periodo 2008 – 2015, se seleccionó como variables los nombres de localidades coincidentes en el área de estudio. Además, con base en el mapa ¿Por dónde circulan los hidrocarburos en México? (Llano y Flores, 2017), se desarrolló el análisis geoespacial del mapa vectorial de ubicación de infraestructura de poliductos con método de comparación visual con herramientas SIG. Una vez generada la capa mediante análisis cuantitativo se pudo medir los trazos vectoriales, de lo que se determinó la longitud de los poliductos de la infraestructura en Jalisco.

El análisis de la red hidrográfica parte del punto de contaminación, a este se le denominó punto de aforo, a partir del cual se calculó las microcuencas aguas arriba. Fue necesario determinar un segundo punto de afo-

ro para delimitar el área de investigación, este fue seleccionado mediante el análisis de confluencias de canales y escurrimientos al río principal de la microcuenca contigua aguas abajo.

Las microcuencas se determinaron por sus características geográficas y topográfica del terreno, considerando los límites de parte aguas, dirección de escurrimientos, confluencia a arroyos o ríos principales, mediante el proceso iterativo de análisis SIG generadas con la herramienta de evaluación de suelos, por sus siglas en inglés SWAT (*Soil and Water Assessment Tool*). Una vez integrada la información del Modelo Digital de Elevación (DEM), SWAT calculó la red hidrológica. Además, para el balance hídrico se integraron datos de estaciones meteorológicas cercanas (CONAGUA, 2019), de registros de precipitación, temperatura y evaporación. Las estaciones y periodos de registro son: (Tala [01/67-12/21], Sta. Rosa [01/55-12/21], Ahualulco [01/38-07/21], La Vega [01/18-03/19] y Guadalajara [01/18-12/18]). Mientras que para obtener información de evapotranspiración potencial (ETP) de la subcuenca se utilizó el la ecuación Penman con el método Penman-Monteith en función de variables de temperatura, radiación solar, humedad relativa y velocidad del viento (Penman, 1948), y la ecuación Muskingum para la simulación del flujo de agua en canales (Norouzi y Bazargan, 2024), basada en el balance de agua. Para la precipitación se obtuvo los valores de la media mensual.

El método geofísico de prospección magnética utiliza como instrumento el magnetómetro. Dicho instrumento, con tecnología avanzada de precesión de protones mediante el efecto Overhauser (Anet y Bourn, 1965, p. 5250), se produce cuando un líquido especial (con electrones no apareados) se combina con los átomos de hidrógeno y luego se exponen a la polarización secundaria de una frecuencia de radio en el campo magnético. Los electrones no apareados transfieren su polarización más fuerte a átomos de hidrógeno, generando así una señal de precesión fuerte que es ideal para mediciones de campo total de muy alta sensibilidad. Por lo que con sensibilidad de 0.022 nT se miden las variaciones magnéticas campo total entre el subsuelo natural y contaminado ligadas a los procesos de oxidación físico-químicos.

Los procesos de migración y dispersión del contaminante en el subsuelo pueden llegar a afectar subcuencas o microcuencas hidrológicas cuando

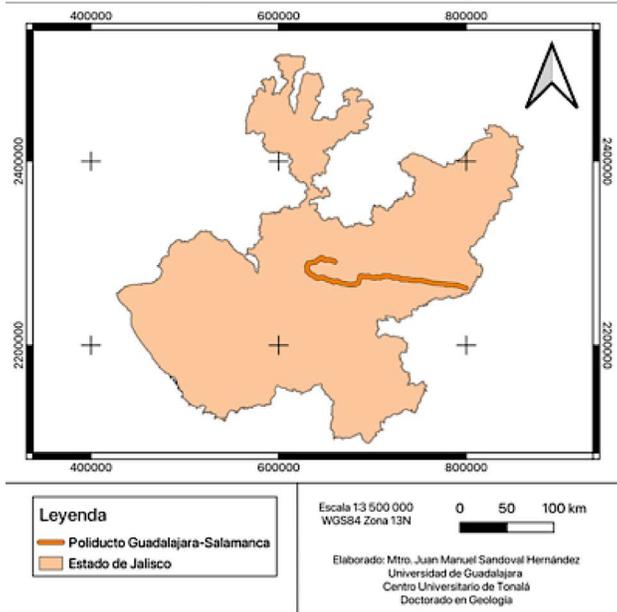
el medio de transporte del contaminante se desarrolla en el nivel freático. Los procesos de transporte del contaminante (lixiviación) surgen en dirección del flujo de aguas subterráneas que a su vez dependen de factores hidrogeológicos.

Resultados

Personal que labora en CAR confirman que en años previos 2019 y 2020, surgió el mismo suceso de contaminación, aunque en menor magnitud. La problemática en 2021 fue tal, que tuvo que ser reportada. Personal de UEPCBJ afirma que las muestras tomadas en diferentes días del año tienen olor a gasolina y/o diésel respectivamente, mientras que en 2022 y 2023 nuevamente surgió la problemática, pero en menor proporción.

En visitas de campo, en situ es posible identificar el punto de contaminación sobre los sedimentos de la poza en cualquier día del año. Además, durante la adquisición de datos geofísicos, los choferes transeúntes que circulaban por la México 70 confirman los hechos de la actividad de sustracción ilícita a unos metros de la carretera en sentido de la circulación vehicular de Guadalajara – Ameca, presumiblemente sobre los poliductos, justo en la zona de estudio, los que describieron que la sustracción de hidrocarburos perduró por tiempo prolongado sobre la zona y de forma descarada en dicho tramo carretero en años posteriores. La infraestructura de la red de poliductos de PEMEX en el estado de Jalisco, se calculó de una longitud de 230 804 Km de tuberías (Figura 6), estos poliductos transportan derivados de hidrocarburos líquidos, tales como gasolina, diesel y turbosina (Llano y Flores, 2017).

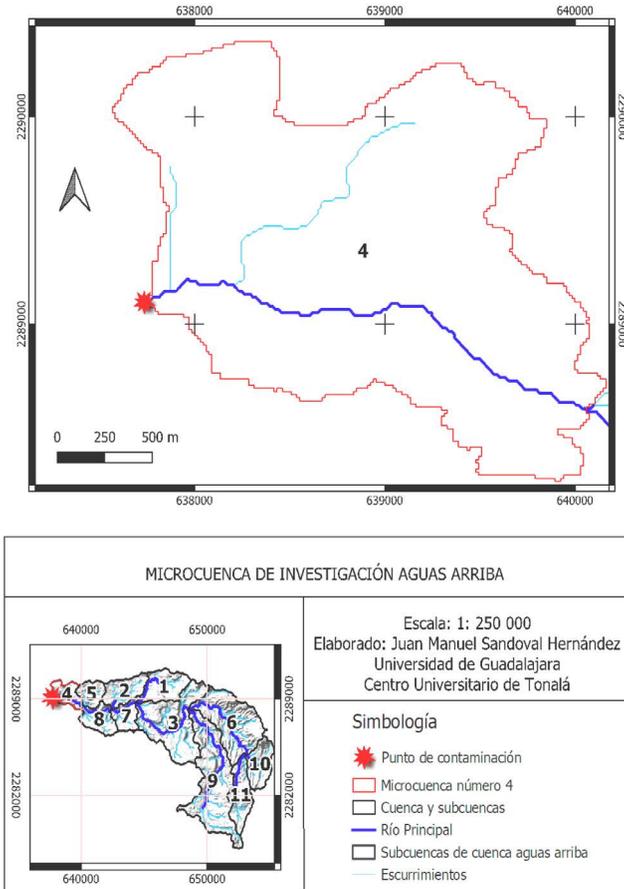
Figura 6
Ubicación de la infraestructura de la red de poliductos, tramo “Salamanca-Zapopan”, en Jalisco



Fuente: Elaboración propia, 2024.

La Vega-Cocula (Figura 9) RH14-A (CEA Jalisco, 2005). Mediante el análisis con software SWAT, se generaron once microcuencas que conforman la subcuenca hidrográfica a partir del punto de contaminación. El río principal de la subcuenca es El Salado de caudal perene proveniente de la sierra La Primavera, a este confluyen los afluentes y escurrimientos de las microcuencas. De las microcuencas generadas con SWAT, destaca la cuatro por ser el lugar específico donde se identifica el punto de contaminación con área de 324 hectáreas (Figura 7), aforo donde se llevó a cabo el monitoreo de los niveles LEL de contaminación. Además de ser, el punto de aforo para generar la subcuenca de este caso de estudio.

Figura 7
 Subcuenca, microcuencas y red hidrológica a partir del punto de contaminación



Fuente: Elaboración propia, 2024.

En el área cercana a la microcuenca cuatro se identificaron 42 tomas clandestinas (Tabla 1) que tienen como distancia promedio 1400 m al punto de contaminación identificado sobre la CAR, específicamente sobre la poza el a cascada.

Tabla 1

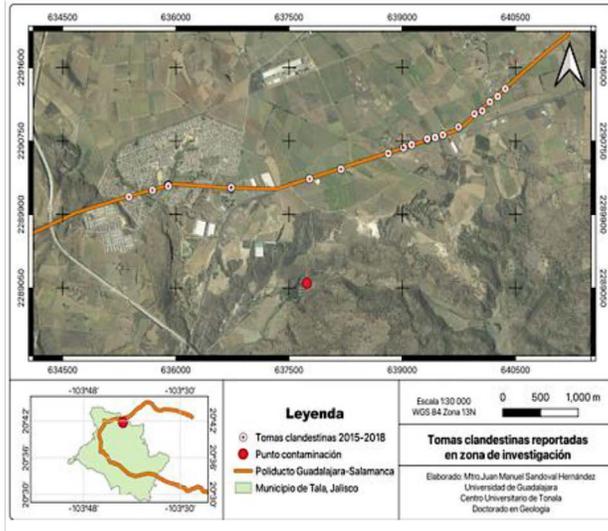
Base de datos georreferenciada de tomas clandestinas, periodo 2008-2015

Fecha	Municipio	km	Fecha	Municipio	km
1 07/10/13	Arenal	322000	22 12/18/2012	Arenal	319750
2 06/30/2012	Arenal	321700	23 11/27/2013	Tala	218661
3 10/14/2014	Arenal	321600	24 03/21/2013	Tala	317778
4 03/07/14	Arenal	321537	25 10/20/2013	Tala	317810
5 01/28/2014	Arenal	322737	26 3/21/20003	Tala	317778
6 01/21/2009	Arenal	322600	27 11/24/2013	Tala	317778
7 07/10/10	Arenal	322737	28 3/19/2014	Tala	317575
8 11/18/2013	Tala	321150	29 03/28/2014	Tala	317575
9 11/18/2013	Tala	321151	30 11/04/09	Tala	317573
10 08/10/12	Tala	321284	31 01/05/13	Tala	31773.5
11 12/10/12	Arenal	321500	32 9/29/2012	Tala	317574
12 01/12/13	Arenal	321500	33 1/19/2013	Tala	317575
13 11/23/2012	Arenal	321500	34 1/24/2013	Tala	317575
14 03/07/14	Arenal	321537	35 03/21/2013	Tala	317778
15 10/14/2014	Arenal	321600	36 10/20/2013	Tala	317810
16 06/30/2012	Arenal	321700	37 11/27/2013	Tala	318660
17 05/27/2013	Arenal	320200	38 08/12/12	Tala	318637
18 11/18/2013	Arenal	320200	39 7/20/2015	Arenal	321605
19 03/11/11	Tala	320900	40 5/15/2015	Arenal	321660
20 12/12/12	Arenal	319750	41 07/10/13	Arenal	322000.35
21 12/06/12	Arenal	319750	42 3/20/2012	Arenal	322500

Fuente: Base de datos tomados de Llano y Flores, 2017.

Se graficó las tomas clandestinas identificadas cerca del punto de contaminación en el sistema SIG, de donde se identifican únicamente 18 puntos georreferenciados, los 24 restantes coinciden con un mismo punto de tomas clandestinas recurrentes, aunque en diferentes fechas (Figura 8).

Figura 8
Mapa de ubicación de tomas clandestinas en zona de estudio

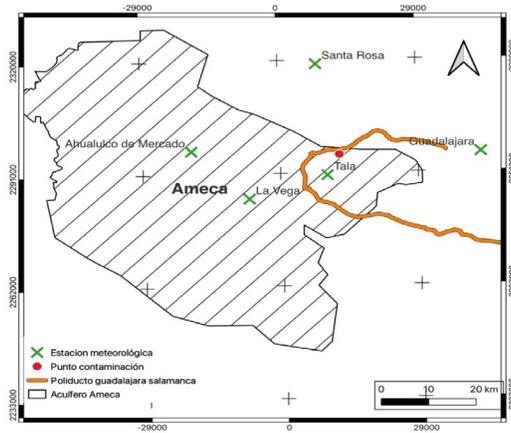


Fuente: Elaboración propia, 2024

La información de temperatura, precipitación y evaporación registrada por los sensores de las cinco estaciones meteorológicas más cercanas al punto de contaminación (Figura 9), así como, las características fisiográficas de la microcuenca, el tipo y uso de suelo, permitieron calcular y elaborar gráficas de precipitación, percolación, evapotranspiración y escurrimiento resultando el balance hídrico (Figura 10). Los valores máximos en el periodo de 2012 a 2021 registraron para la precipitación 200-330 mm; En tanto, la infiltración o percolación 10-22 mm; La evapotranspiración registrada de 130-160 mm; y la escorrentía de 7-60 mm. De los datos anteriores se deduce que el suelo de la zona de estudio presenta bajos valores de escorrentía, de lo que se puede deducir en el gráfico que la mayor parte de la precipitación se infiltra verticalmente hacia las capas profundas del subsuelo, lo que sugiere que alcanzaría el nivel freático, favorecido por el tipo y uso de suelo, condiciones geológicas, que contribuyen al incremento de flujo de agua subterránea.

Figura 9

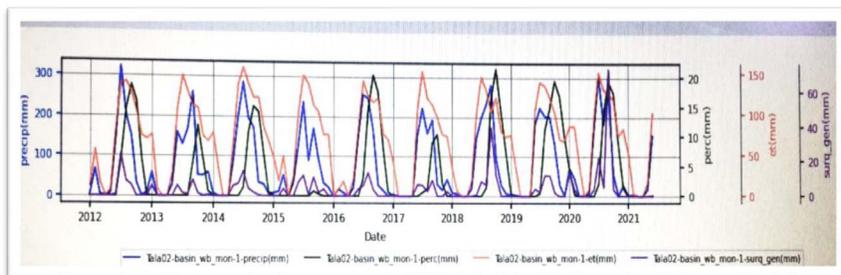
Ubicación de estaciones meteorológicas, acuífero Ameca, y punto de contaminación



Fuente: Elaboración propia, 2024.

Figura 10

Gráfica de balance hídrico generada con información meteorológica con el software SWAT, periodo 2012-2021. Los valores están en milímetros, en color azul se muestra los valores de precipitación (precip), en verde infiltración o percolación (perc), en rojo la evapotranspiración (et), y en morado la escorrentía superficial (surq_gen).



Fuente: Elaboración propia, 2024. Con datos de CONAGUA.

Los niveles de percolación se asemejan al comportamiento de los niveles LEL medidos, o sea que, existe una relación del comportamiento hídrico de la microcuenca, temporada de lluvias con las emanaciones del contaminante transportado, aunque con un desfase de los niveles máximos

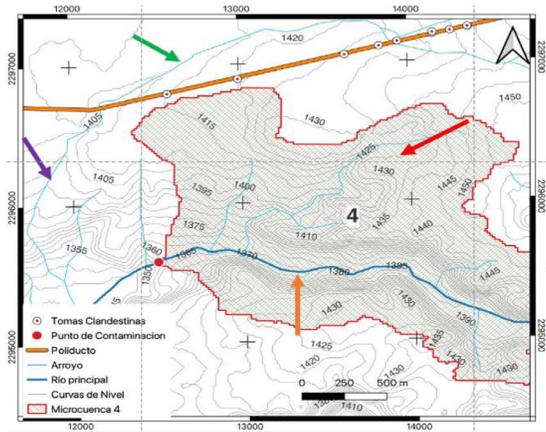
de emanación del contaminante de aproximadamente un mes. Lo anterior se adjudica al proceso de infiltración, en el que el volumen de agua precipitado supera el volumen escurrido y evapotranspirado, por lo tanto, se incrementa la saturación del nivel freático, que al incrementarse el flujo de aguas subterráneas favorece el transporte de lixiviados, situación contraria en temporada de estiaje, o sea, menor flujo de aguas subterráneas provocará la disminución de emanación del contaminante.

Los resultados del análisis anterior, sugieren que, debido al comportamiento de emanación del contaminante, la ubicación de la fuente de contaminación está presente en la microcuenca cuatro y que los lixiviados están siendo transportados por el incremento del flujo de aguas subterráneas, en la dirección al río principal, después hacia la presa de la vega (CONAGUA, 2015, p. 9). Este incremento es debido al fenómeno de infiltración por el incremento de la precipitación que favorece la saturación del manto freático. Se descarta que el contaminante provenga de cuencas aguas arriba transportado por el flujo perene de aguas superficiales del río El Salado, por una parte, por los resultados negativos del muestreo de aguas arriba (UEPCBJ, 2022). Por otro lado, el contaminante tendría emanaciones constantes que resultaría en una gráfica que mostraría contaminación lineal en cualquier época del año distinta a la gráfica de la figura 5. El parámetro de temperatura fue de utilidad para el cálculo de la evapotranspiración, que está en función de la temperatura media mensual. Los niveles máximos de evapotranspiración se dan cuando el suelo está provisto de agua. Los valores de evapotranspiración se toman para el balance hídrico.

Para la delimitación de la zona de estudio con base en la microcuenca cuatro, se realizó análisis hidrológico y altimetría (Figura 11). En tanto, para el análisis hidrológico y de acuerdo con CONAGUA se considerando que la dirección de flujo de aguas subterráneas en la microcuenca de estudio es hacia el río principal, en sentido de las principales corrientes superficiales y hacia la presa de la Vega (CONAGUA, 2015). Lo anterior se validó con SWAT añadiendo información de modelos digitales de información de uso y tipo de suelo para el estudio de escorrentía y caudal, lo que confirma mediante la simulación del flujo de agua en canales que proyecta la dirección de escorrentía del flujo de agua en la subcuenca hidrográfica es hacia el afluente principal, proporcionando información sobre el comportamiento hidrológico de la microcuenca.

Figura 11

Mapa que señala con flechas los límites considerados para la selección de la zona de estudio, indicados con las flechas

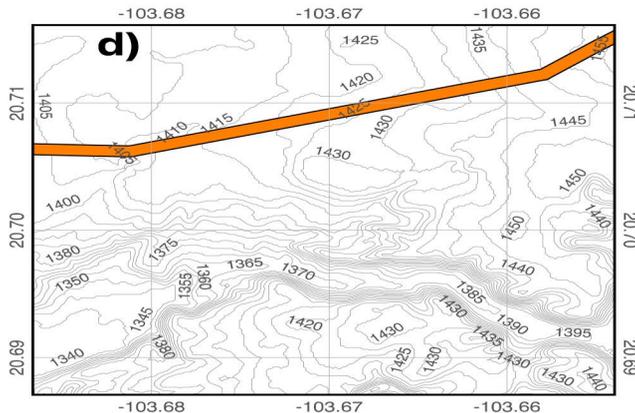


Fuente: Elaboración propia, 2024.

Finalmente, con la combinación del análisis hidrológico y la altimetría, se determinó los límites (Figura 11), al norte (flecha verde) el arroyo superior, al sur (flecha naranja) el río principal, al este por la isolínea de nivel (flecha roja) en 1430 m y finalmente al oeste (flecha morada) el arroyo. Quedando como resultado el área de investigación delimitada por la línea en color rojo (Figura 12).

Figura 12

Límites de la zona de estudio

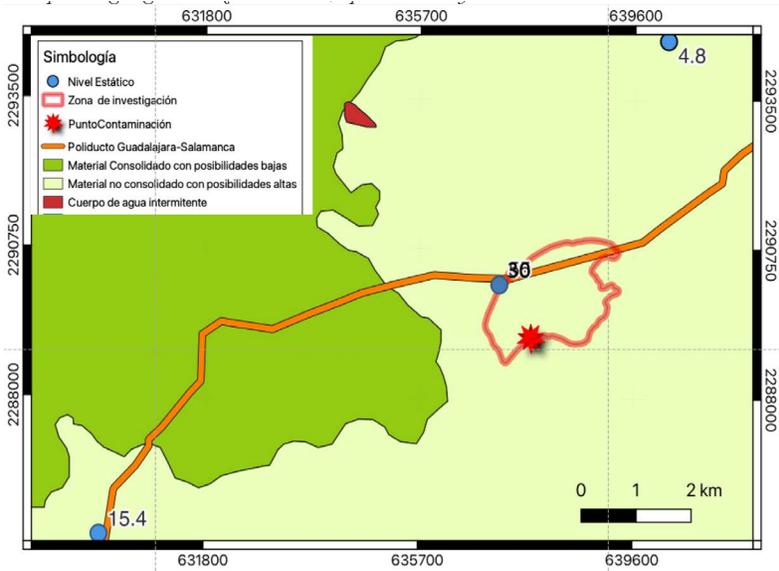


Fuente: Elaboración propia, 2024

Según mapa hidrogeológico con datos de INEGI, el nivel estático registrado en pozo de aprovechamiento ubicado dentro del área de investigación es de 30 m, con material no consolidado con posibilidades hidrológicas altas, permeabilidad del suelo favorable debida a granos finos (Figura 13), lo que concuerda con los resultados del balance hídrico.

Figura 13

Mapa hidrogeológico de la zona de estudio, tipo de material y niveles estáticos

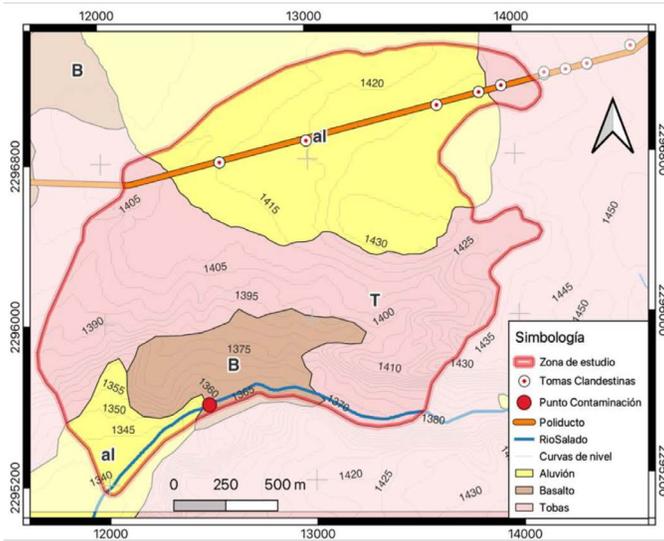


Fuente: Elaboración propia con base en información de INEGI, 2018.

La geología de la microcuenca que conforma parte del área de estudio, está conformada por aluvión, el cuál forma una planicie con altura de 1420 m.s.n.m. justo en la parte alta de la microcuenca, en el sur está conformada por rocas volcánicas del tipo toba con pendiente hacia el río principal que va desde 1430 a 1395 m.s.n.m., en tanto en el punto de contaminación se identifica rocas Basálticas que de igual manera forma una pendiente que va desde aproximadamente 1395 a 1340 m.s.n.m., (Figura 14). Por lo que la permeabilidad de los suelos es factor hidrogeológico de la infiltración al estar los ductos sobre aluvión favorecer la infiltración del contaminante.

Figura 14

Mapa geológico de la zona de estudio

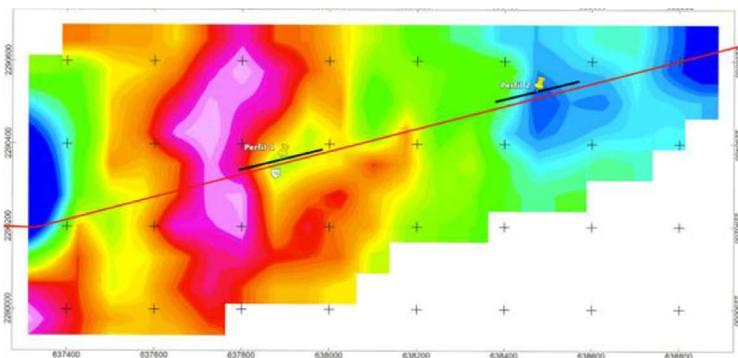


Fuente: Elaboración propia, 2024.

La prospección magnética, se realizó en la zona de estudio, con recorridos paralelos en dirección Este Oeste, distanciamiento aproximado de 40m entre líneas de adquisición de datos. A las líneas de datos contiguas y paralelas al poliducto se interpolación aplicando la reducción al polo correspondiente, obteniendo con ello el campo magnético total. El mapa resultante muestra 800m de este a oeste, resultando una diferencia en los valores de campo total que van del suelo considerado como no contaminado 39994nT a suelo considerado anómalo con valores de 40417nT que se puede asociar en una primera fase de procesamiento a una anomalía encajante en el suelo natural de área, que representa una diferencia de 423nT (Figura 15).

Figura 15

Anomalía de campo total, reducida al polo, la línea naranja representa poliducto y la negra perfiles de tomografía eléctrica

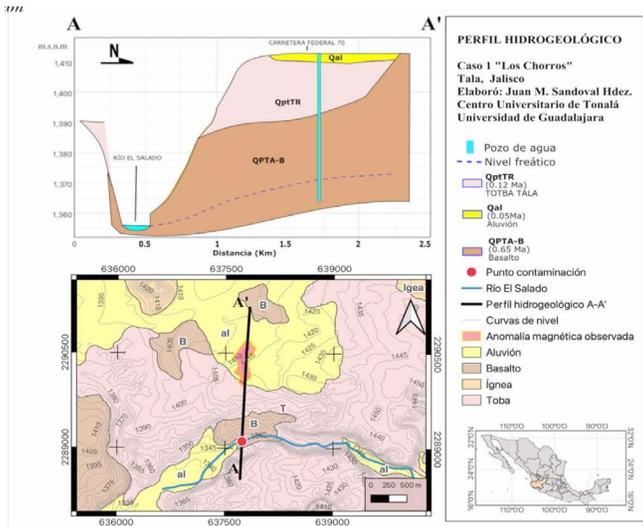


Fuente: Elaboración propia, 2024.

En una vista general de la zona de estudio se puede ver que la anomalía magnética tiene una forma alargada con dirección preferente NE, y que si se traza una línea hasta el punto de contaminación, se puede interpretar que lleva dirección hacia el punto de contaminación (Figura 16). La información hidrológica, hidrogeológica, altimetría, geología, la sísmica de refracción sugieren en el modelo Geohidrológico (Figura 16), una pendiente que podría favorecer el transporte de hidrocarburos desde la posible fuente de contaminación (anomalía magnética de campo total) hasta el punto de contaminación.

Figura 16

Modelo geohidrológico, perfil A-A', con dirección N del punto de contaminación hacia la posible fuente de contaminación



Fuente: Elaboración propia, 2024.

Discusión

A pesar de los resultados obtenidos por autoridades municipales y estatales en muestras de análisis químicos y los niveles de LEL tomados durante la contingencia en 2021, que demostraron la presencia de hidrocarburos. Contradictoriamente, PEMEX presentó dictamen en marzo 2022 que revelan, que no es gasolina lo que contaminó el afluente del río el salado en Tala. Los resultados concluyen, buen estado hermético de los ductos, y aseguran que los químicos encontrados en las muestras no corresponden la fórmula química de gasolina o diésel y que no se registran índices de explosividad.

Dichos estudios, bastaron para que la paraestatal se deslindara de la problemática ambiental, no habiendo presentado ningún tipo de caracterización del subsuelo de las fugas selladas, de lo que se infiere la ausencia de seguimiento en la prevención impacto ambiental en aguas subterráneas.

Lo anterior, no aporta hacia la sostenibilidad del medio de transporte por ductos y el ambiente. Por lo que, la fuente de contaminación es desconocida. Lo que implica que, no existe pasivo ambiental, declaratoria de riesgo ambiental y por lo tanto no habrá remediación del subsuelo, hasta demostrar lo contrario. Aunque el desarrollo de esta investigación está en su primera fase, el objetivo es la búsqueda de la fuente de contaminación. Si bien, el modelo conceptual de infiltración en el subsuelo, determina que los lixiviados son transportados por y en dirección del flujo de aguas subterráneas. Se discute la posibilidad de interpretar la anomalía con los resultados de la exploración geofísica, geológica, hidrológica y geohidrológica para interpretar la posible fuente de contaminación.

Con base en la entrevista, en años anteriores a la contingencia ambiental del 2021, ya había iniciado la emanación del contaminante al afluente, aunque en baja proporciones. La relación del bajo nivel de precipitación para años posteriores, hizo que disminuyera la cantidad de contaminante que emanó al afluente, no llegando a ser importante en 2022 y 2023. Sin embargo, el químico sigue emanando en los sedimentos de la poza de la cascada. Lo que mantiene la discusión de que la fuente de contaminación sigue presente. Por lo que, no solo en este caso de estudio los lixiviados seguirán transportándose en dirección de flujo de aguas subterráneas contaminando cuerpos de agua subterránea. Si no que, seguirá en asenso el riesgo de contaminación de aguas subterráneas en sitios por donde se localiza la infraestructura de ductos que transportan derivados de hidrocarburos en donde se realizan actividades de sustracción ilícita, que mientras no se caracterice el subsuelo ante este fenómeno, el riesgo seguirá latente.

En materia de Seguridad Industrial, Operativa y Protección al Medio Ambiente, para el transporte terrestre por medio de Ductos de Petróleo, Petrolíferos y Petroquímicos, señala en el capítulo III, artículo 80 el establecimiento de programa de patrullaje como obligación, el capítulo IV administrar la integridad e identificar las amenazas potenciales entre otras obligaciones que señala la ley. ¿Qué no será entonces injusto el cobro del CTPNO, al usuario final? Sino que, más bien ¿Será necesario, el endurecimiento de contratos, eficiencia en protocolos y leyes, con la mira en acciones a quienes generen contaminación y degradan el valor de la propiedad?

Finalmente, con el CTPNO, se puede discutir la postura del gobierno, pues se puede inferir que se preocupa por las pérdidas económicas de la

industria, mas no por la sostenibilidad ambiental, lo que seguirá agravando la contaminación de cuerpos de agua subterránea, debida a la sustracción ilícita en ductos de transporte de hidrocarburo.

Conclusiones

La expansión de infraestructura de ductos a nivel nacional como medio de transporte de productos energéticos y materias primas industriales, favorecen el desarrollo industrial y económico globalizado. Además, de las formas de transporte conocidas, los ductos son un medio efectivo, económico y sostenible para el suministro de las cadenas de producción.

Las normas de manejo del transporte por ducto prevén excelencia operativa, control, mantenimiento, valores de sustentabilidad, rentabilidad, monitoreo tecnológico y software de información e indicadores en tiempo real, para evitar y responder oportunamente ante las acciones de fugas o derrames que amenacen la sostenibilidad y riesgo de contaminación de cuerpos de agua. Sin embargo, los daños provocados por la disposición clandestina afectan la sostenibilidad del medio de transporte de hidrocarburos por ducto, provocan mayor gasto al bolsillo del consumidor en las zonas donde se aplica el CTPNO, degrada el medioambiente, contamina el subsuelo, pone en riesgo la disposición de aguas subterráneas, afecta la salud pública de sus habitantes y genera violencia por el control de la actividad ilícita. Aunado a lo anterior, al no haber culpables, cuando se reporta contaminación en aguas subterráneas, los costos de caracterización de posible pasivos ambientales provocados por el negocio de la sustracción ilícita y remediación sí se llegarán a efectuar, serán absorbidos por la sociedad.

En México el incremento al costo final de hidrocarburos calculado con base en la disposición clandestina reportada por tramos de infraestructura de ductos CTPNO, es indicador de ineficiencia. Pues tiene como fin, cobrar al usuario final las pérdidas en forma de CTPNO. Recaudación bonificada a la industria energética para compensar las pérdidas económicas calculadas por las fugas. Por lo tanto, la actividad ilícita no genera pérdidas a la industria que transporta hidrocarburos debido al CTPNO. Tampoco, a la delincuencia organizada, pues este negocio es una actividad que solo genera importantes ganancias económicas.

Actualmente, los protocolos, métodos y procedimientos de detección y atención de fugas, se centran en el sellado de la misma, para inmediatamente después, continuar con el transporte del hidrocarburos lo antes posible. De lo anterior se deduce que, no es de interés evaluar daños al subsuelo y aguas subterráneas en cada fuga.

Por otro lado, al considerar los reportes de fuga como seguridad nacional, la información no está disponible para hacer un análisis de riesgo. Factor que se suma a la amenaza de contaminación de cuerpos de agua, a tal grado que la atención de sitios contaminados es necesaria, cuando los lixiviados ya contaminaron aguas subterráneas, siendo reportadas por la ciudadanía afectada.

El desarrollo de investigaciones para determinar el impacto ambiental de sitios reportados con fugas de hidrocarburos derivadas de tomas clandestinas, es de suma importancia para evaluar el riesgo de contaminación de aguas subterráneas y favorecer la sostenibilidad entre el medio de transporte de petroquímicos, el medioambiente y el desarrollo económico. Por lo que, se debe fortalecer la investigación de metodologías para caracterizar contaminación de hidrocarburos en el subsuelo, mediante métodos rápidos de ejecutar, no invasivos y económicos.

El estudio del comportamiento de lixiviados en el subsuelo es complejo debido a las condiciones hidrogeológicas, por lo que se requiere desarrollar investigación con metodologías complementarias, y valorar la importancia del agua contra el desarrollo industrial. Sobre los estudios presentados en este estudio, hasta el momento sugieren, la ubicación de la posible fuente de contaminación. Sin embargo, es necesario completar más estudios, con otras metodologías sensibles para finalmente realizar un muestreo de sedimentos profundo en el punto que los métodos geofísicos sugieran, realizar análisis químico apegado a la NOM correspondiente.

Referencias bibliográficas

- Álvarez-Manilla Aceves, A., Valadéz Castro, J. P., Garnica Anguas, P. & Martínez Peña, G. E. I. (2002). *La permeabilidad de los suelos en los problemas de transporte de contaminantes*. Aplicación en la infraestructura del transporte. <https://www.imt.mx/archivos/publicaciones/publicacion-tecnica/pt195.pdf>
- Anet, F. A. L., & Bourn, A. J. R. (1965). Nuclear Magnetic Resonance Spectral Assignments from Nuclear Overhauser Effects. *Journal of the American Chemical Society*, 87(22), 5250–5251. <https://doi.org/10.1021/ja00950a048>
- ATSDR (1995). *Resumen de salud pública: gasolina para automóvil*. In CAS#: 80006-61-9. https://www.atsdr.cdc.gov/es/phs/es_phs72.pdf
- Bernal Avendaño, A. (2020, September 29). Combate al huachicol un éxito, se ha disminuido en un 94% el delito: GMSI. *Regeneración Medio de Información Libre e Independiente*. <https://regeneracion.mx/combate-al-huachicol-un-exito-se-ha-disminuido-en-un-94-el-delito-gmsi/>
- Castro, V. G. (2007). *Informe Final: Diseño Monitoreo Frente Derrames De Hidrocarburos*. Prasa.
- CEA Jalisco (2005). Cuenca Presa La Vega-Cocula. www.ceajalisco.gob.mx/contenido/cuencas_jalisco/img/Cuencas%20Hidrologicas%20en%20Jalisco.pdf
- Celovic, A. (2019, May 6). Pipeline History: first modern pipeline commissioned 400 years ago. *Pipeline Technology Journal*. <https://www.pipeline-journal.net/news/pipeline-history-first-modern-pipeline-commissioned-400-years-ago>
- CONAGUA (2015). *Actualización de la disponibilidad media anual de agua en el acuífero Ameca (1409), Estado de Jalisco*. https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/103719/DR_1409.pdf
- CONAGUA (2017). *¿Sabes cuál es el lago más grande de México?* Gobierno de México. <https://www.gob.mx/conagua/articulos/sabes-cual-es-el-lago-mas-grande-de-mexico?idiom=es>
- CRE (2022). *Informe de labores 2022*.
- CT_PEMEX. (2018). ACUERDO-CT 10.18.O.18 PEMEX. *Reserva parcial de la información de tomas clandestinas*. <https://serendipia.digital/wp-content/uploads/2018/05/1857200120518-2.pdf>

- De los Reyes, P. R. (2022). *Energía, cambio tecnológico e impacto ambiental: una historia económica*. In AEHE (Ed.), *Lamentos y silbatos: el oleoducto y la refinería de la Ciudad de México* [Plenaria 2] (pp. 1–38). XIII Congreso Internacional Asociación Española de Historia Económica, España. https://congresosaehe.es/wpcontent/uploads/2022/06/Plenaria2_ReynaldoReyes.pdf
- DOF (2003, October 8). *Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos*. Última Reforma Publicada DOF 08-05-2023. https://dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=688657&fecha=08/10/2003#gsc.tab=0
- DOF. (2017, March 31). *Disposiciones administrativas de carácter general que establecen los Lineamientos en materia de Seguridad Industrial, Seguridad Operativa y Protección al Medio Ambiente, para el transporte terrestre por medio de Ductos de Petróleo, Petrolíferos y Petroquímicos*. Secretaría de Gobernación. https://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5478203&fecha=31/03/2017#gsc.tab=0
- Emanuel, R. E., Caretta, M. A., Rivers, I. L., & Vasudevan, P. (2021). *Natural Gas Gathering and Transmission Pipelines and Social Vulnerability in the United States*. *GeoHealth*, 5(e2021GH000442), 1–12. <https://doi.org/10.1029/2021gh000442>
- Felice Uricchio, V., Paparella, S., & Falconi, M. (2023). *L'innovazione per la sostenibilità ambientale nell'epoca della multitransizione* (S. Di Marcello, Ed.). RemTech Expo 2023.
- Frago, C. H. (1993). *The Biodegradation Potential of Methanol, Benzene, and m-Xylene in a Saturated Subsurface Environment* [Tesis Doctoral, Faculty of Virginia Polytechnic Institute and State University]. https://vtechworks.lib.vt.edu/bitstream/handle/10919/42958/LD5655.V855_1993.F734.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- García, V. L. A., & Fernández, V. G. (2014). Health Risk Assessment of Zone 7 Contaminated with Benzene in the Environmental Liability Generated by the “March 18th Ex-Refinery” in Mexico City. *Ingeniería, Investigación y Tecnología*, 15(3). [https://doi.org/10.1016/s1405-7743\(14\)70351-8](https://doi.org/10.1016/s1405-7743(14)70351-8)
- Gobierno de México. (2020). *Estos son los 5 municipios de Jalisco con más tomas clandestinas de hidrocarburos* (Milenio, Ed.). <https://www.youtube.com/watch?v=M4z5KkE8K30>

- Gómez-López, C. S., Barrón Arreola, K. S., & Moreno Moreno, L. (2011). Crecimiento económico y medio ambiente en México. *Trimestre Económico*, 78(311). <https://doi.org/10.20430/ete.v78i311.42>
- González Pérez, M. G., Serafín González, S. L., García García, E. X. M. & Soto Felix, M. (2023). *Neociudades, Expresiones postcovid en la ciudad y el territorio* (Astra Ediciones). Universidad Politécnica del Estado de Nayarit. https://www.academia.edu/113654997/Neo_ciudades_Expresiones_post_covid_en_la_ciudad_y_el_territorio?uc-sb-sw=13426426
- Hanesch, M., & Scholger, R. (2002). Mapping of heavy metal loadings in soils by means of magnetic susceptibility measurements. *Environmental Geology* 2002 42:8, 42(8), 857–870. <https://doi.org/10.1007/S00254-002-0604-1>
- Herrera, E. (2020, September 18). *Alentador, resultado de combate al huachicol, pero es necesaria más tecnología: GMSI*. Milenio, Negocios. <https://www.milenio.com/negocios/combate-huachicol-alentador-necesita-tecnologia-gmsi>
- Katyukha, P., & Mottaeva, A. (2021). Transformation of the global oil pricing structure in the conditions of increasing competition of leading players in the oil market. In *E3S Web Conf.* (Ed.), Ural Environmental Science Forum “Sustainable Development of Industrial Region” (UESF-2021), 258, 1–9. <https://doi.org/10.1051/e3s-conf/202125806064>
- Kolb, M. (2021, August 24). *What Is Globalization? And How Has the Global Economy Shaped the United States?* Peterson Institute for International Economics (PIIE). <https://www.piie.com/microsites/globalization/what-is-globalization>
- Le Sève, M. D., & De Souza, E. (2024). Stewardship at the Source. Driving water action across supply chains. *Global Water Reporte 2023*. CDP, *Disclosure Insight Action*, 1-40. https://cdn.cdp.net/cdp-production/cms/reports/documents/000/007/620/original/CDP_Water_Global_Report_2023_.pdf?1711030114
- León, L., & Nacar J. (2017, August 24). Del ejido al huachicol/Golpe ambiental. *Ejecentral, Semanario* #64, 13–17. <https://www.ejecentral.com.mx/del-ejido-al-huachicol/>

- Llano, M., & Flores, C. (2017, July). *Ductos. ¿Por Dónde Circulan Los Hidrocarburos En México?* https://cartocritica.org.mx/wp-content/uploads/2017/07/CartoCr%C3%ADtica_HBS_MapaDuctos_ALTA.pdf
- Longley, Paul. A., Frank Goodchild, M., Maguire, D. J., & Rhind, D. W. (2015). Geographic Information Science and Systems. In J. Wiley & Sons (Eds.), *International Encyclopedia of Human Geography, Second Edition* (Second). <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-102295-5.10557-8>
- López Obrador, A. M. (2020). *Transporte de hidrocarburos por ductos en México.* https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/539262/1_PE-MEX_LOGISTICA-CENAPRED_-_17ene2020.pdf
- Norouzi, H., & Bazargan, J. (2024). Investigation of river water pollution using Muskingum method and particle swarm optimization (PSO) algorithm. *Applied Water Science*, 14(4), 68. <https://doi.org/10.1007/s13201-024-02127-0>
- OECD (2020). *Panorama de las Administraciones Públicas América Latina y el Caribe 2020.* OECD. <https://doi.org/10.1787/1256b68d-es>
- ONU (1987). *Our common future.* *World Farmers' Times*, 2(9). <https://doi.org/10.4324/9781315270326-140>
- Orozco Carbajal, J. (2011). Transporte de Hidrocarburos por Ductos. In *Asociación de Ingenieros Petroleros de México, A. C., Delegación México* (pp. 1–114).
- Peña García, L., Maciel Flores, R., Rosas Elguera, J. G., & Alatorre Zamora, M. Á. (2012). *Las aguas subterráneas en Jalisco: una aproximación a su situación actual.* https://www.ceajalisco.gob.mx/sites/MicrositioCAA/docs/2012/03_agua_subterranea_laura_pena_udg.pdf
- Penman, H. L. (1948). Natural Evaporation from Open Water, Bare Soil and Grass. *Proceedings of the Royal Society of London. Series A, Mathematical and Physical. J. Franklin Inst*, 193(1032). <http://soilphysics.okstate.edu/teaching/soil-6583/references-folder/penman%201948.pdf>
- Reyes, M. (2021). *Determinación de compuestos derivados del petróleo como agentes contaminantes presentes en el agua subterránea de la ciudad industrial de linares, Nuevo León, México* [Maestría en Ciencias con Orientación en Ingeniería Ambiental, Universidad Autónoma de Nuevo León]. <http://eprints.uanl.mx/23814/1/1080328506.pdf>

- Russell Bernard, H. (2011). *Research Methods in Anthropology: Qualitative and Quantitative Approaches (FIFTH)*. Alta Mira Press. https://books.google.com.mx/books?id=Ngg-MNMH1YoC&pg=PA1&hl=es&source=-gbs_toc_r&cad=1#v=onepage&q&f=false
- SEMARNAT (2013a). *Atmósfera. Informe de La Situación Del Medio Ambiente En México*. Compendio de Estadísticas Ambientales. Indicadores Clave y de Desempeño Ambiental.
- SEMARNAT (2013b, September 10). *Norma Oficial Mexicana NOM-138-SEMARNAT/SSA1-2012*. Límites Máximos Permisibles de Hidrocarburos En Suelos y Lineamientos Para El Muestreo En La Caracterización y Especificaciones Para La Remediación. DOF Secretaría de Gobernación [Archivo PDF En Línea], Segunda Sección, 1–16. <https://www.profepa.gob.mx/innovaportal/file/6646/1/nom-138-semarnat.ssa1-2012.pdf>
- SEMARNAT (2021, november 4). *Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, Diario Oficial de la Federación de México*. Programa Nacional de Remediación de Sitios Contaminados 2021-2024, Programa Especial Derivado Del Plan Nacional de Desarrollo 2019-2024. https://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5634656&fecha=05/11/2021#gsc.tab=0
- Solórzano Chamorro, J. J., Vera Basurto, J. S., & Buñay Cantos, J. P. (2022). Crecimiento económico y medio ambiente. *RECLAMUC203*, 6(1), 203–212. [https://doi.org/10.26820/reciamuc/6.\(1\).enero.2022.203-212](https://doi.org/10.26820/reciamuc/6.(1).enero.2022.203-212)

Capítulo 1.4

Gestión, sustentabilidad y ecohidrología del Río Santiago

Tania Villaseñor Vargas¹

Aida Alejandra Guerrero-de León²

<https://doi.org/10.61728/AE24004275>



¹ Estudiante del Doctorado en Agua y Energía, adscrito al Departamento de Estudios del Agua y la Energía del Centro Universitario de Tonalá de la Universidad de Guadalajara. *e-mail:* rania.villasenor3610@alumnos.udg.mx

² Profesora investigadora Departamento de Estudios del Agua y la Energía del Centro Universitario de Tonalá de la Universidad de Guadalajara. *e-mail:* aida.guerrero@academicos.udg.mx

Introducción

El planeta tierra se cubre con más del 70 % de agua en su superficie, esta se puede encontrar distribuida mayormente en océanos, ríos, lagos, en el suelo y aire; de ese total de agua el 97.5 % del agua es salado mientras que el 2.5 % es agua dulce; el 80 % del agua dulce esta principalmente en los glaciares, la nieve y el hielo de los cascos polares, el 19 % es agua subterránea y el 1 % está en la superficie (en lagos o humedales) (Fernández, 2012). El agua es una fuente indispensable para vivir y por eso se han desarrollado distintas obras que permiten asegurar disponibilidad de agua cerca de cualquier entorno, entre las obras se encuentran: canales, pozos, acueductos, drenes, presas, reservorios artificiales, entre otro más.

El recurso hídrico es muy importante en la sociedad y en la economía, por lo que es muy importante su manejo sustentable; la sustentabilidad es definida como “el uso de agua que sostiene una sociedad para que dure y en un futuro indefinido sin que se altere el ciclo hidrológico para que los ecosistemas puedan depender de él”. La sustentabilidad necesita que se establezcan varios criterios que vayan dirigidos al diseño y manejo de las infraestructuras, calidad ambiental, mantener estándares de cuerpos de agua constante, desarrollar mecanismos que prevengan y resuelvan conflictos del agua; siguiendo este paso se puede iniciar la sustentabilidad en el agua (Cervera, 2007).

El mundo, la sociedad y el medioambiente están en cambio constante al igual que el planeta y el ciclo hidrológico, a lo que lleva a adaptar y aprobar herramientas utilizadas en el presente para el manejo hidrológico y de los recursos hídricos. Las alteraciones importantes del medioambiente en las corrientes fluviales provocadas por el cambio climático afectan la provisión de bienes ecológicos y servicios del ecosistema en sistemas acuáticos. Se están desarrollando herramientas científicas para la conservación y recuperación de los sistemas acuáticos, por medio de estas investigaciones se han desarrollado nuevos conceptos y métodos analíticos en una disciplina

complementaria a la hidrobiología llamada: Ecohidrología (Martínez y Villalejo, 2019).

Esta revisión bibliográfica analiza los problemas del desarrollo sustentable que hay en la Zona Metropolitana de Guadalajara, a partir de la contaminación industrial y urbana que son directamente vertidos en el Río Santiago, desde su salida en Chapala hasta desembocar en el estado de Nayarit en el Océano Pacífico. En México hay una mayor preocupación por el agua potable que por el tratamiento de aguas residuales. En el año 2000 México fue uno de los países más bajos entre los que se encuentra en la Organización Cooperación Económica para el Desarrollo (OCDE) ya que solo trató un 23 % de sus aguas residuales. Los tratamientos para aguas residuales tienen costos económicos, sociales, ambientales y de salud (Durán y Torres, 2009). Este rápido crecimiento industrial – urbano provocó una presión sobre los recursos hídricos de la región.

El crecimiento poblacional de Guadalajara se ha dado principalmente por la migración y la creciente industrialización que ha tenido estas últimas décadas, a su vez se han mejorado las condiciones de salud y gracias a eso mejoraron las tasas de natalidad. El crecimiento demográfico provocó una expansión urbana y conurbada en la Zona Metropolitana de Guadalajara (ZMG), a su vez otras ciudades en el país presentaron este mismo fenómeno (Núñez, 1999). El crecimiento de la industria ha generado un aumento en la infraestructura urbana, demanda de agua y de vivienda; la industrialización no solo se dio en Guadalajara, sino también en Tlaquepaque, Zapopan y Tonalá (los cuales se fueron incorporando a la ZMG), en 1998 ya había 16 730 industrias, lo cual había convertido a Guadalajara en una de las ciudades de mayor importancia económica en el país (Durán y Torres, 2009).

El Salto, Juanacatlán, Tlajomulco de Zúñiga, Zapotlanejo e Ixtlahuacán de los membrillos estaban muy cerca de la ciudad y se agregaron a la conurbación metropolitana. Para entender el problema de contaminación es importante mencionar que en el Salto se desarrolló el famoso “corredor industrial de Jalisco”, que es de los más importantes del estado de Jalisco y del país. Debido a esto, la demanda de agua en los últimos años ha rebasado la oferta disponible en la ZMG y se han buscado nuevas fuentes de abastecimiento (además de Chapala) y se han construido diversas obras hi-

dráulicas para llevar agua y asegurar agua en un futuro, sin embargo, estas obras solo han respondido a corto plazo y se continúa en la búsqueda de alternativas para el abastecimiento de agua (Durán y Torres, 2004).

Ecohidrología y sustentabilidad

La ecohidrología es la regulación de los ciclos hídricos y de nutrientes y tiene la finalidad de mejorar la conducción del ecosistema global; esto se entiende como la mejora de los recursos hídricos, la biodiversidad, los servicios ambientales que brindan los ecosistemas acuáticos para la población y el aumento de resiliencia ante el impacto ambiental que se ha ocasionado por el cambio climático (WWAP, 2018). La ecohidrología se relaciona con la hidrología y la ecología del ciclo hidrológico, estos procesos se llevan a cabo en ríos, lagunas, aguas subterráneas y balances energéticos termodinámicos en la superficie terrestre.

La agenda 2030 con sus objetivos del desarrollo sostenible ha mencionado en la meta 6.6: “proteger y restaurar los ecosistemas acuáticos, incluyendo acuíferos, montañas, bosques, humedales y lagos para el 2030” con la finalidad de apoyar el logro del ODS: “garantizar la disponibilidad y gestión sostenible de agua y saneamiento para todos” incluyendo otros objetivos de agua, saneamiento, eficiencia en el uso del agua, calidad del agua y gestión integrada (UNESCO, 2012).

La ecohidrología es un enfoque innovador que promueve la integración de la ecología y la hidrología con miras a la gestión sostenible de los recursos hídricos. La gestión de los recursos hídricos depende de la capacidad para mantener los procesos de circulación del agua junto con sus nutrientes y flujos energéticos mediante varios procesos: biológicos, biogeoquímicos e hidrológicos como herramientas de gestión. La ecohidrología elabora y pone en práctica métodos innovadores y eficaces para la mejorara de la calidad del agua, frente al exceso consumo del recurso hídrico (UNESCO, 2012).

Menciona Maestu (2015) que existen algunos retos para la implementación de los diferentes objetivos de desarrollo sustentable en relación con el recurso hídrico y son:

a) Agua, saneamiento e higiene - WASH: Hay una gran necesidad de localizar y aumentar financiamiento, capacidad institucional, apoyo político y la gestión en la aplicación de la normativa en gestión del agua. Es necesario desarrollar y mejorar tecnologías para enfrentar problemáticas para el saneamiento y la higiene.

b) Gestión del recurso de agua – WRM: El dinero destinado a los recursos hídricos es insuficiente y es importante mejorar la financiación para la gestión del agua. En muchos países hay un déficit de estructura hídrica y eso ocasiona complicaciones para cumplir con sus objetivos. También existen desafíos para implementar tecnologías adecuadas. La eficiencia del agua en varios países es causada por la gestión del recurso hídrico. Muy pocos países avanzan en la ejecución de técnicas de mejora del riego y la recolección del agua de lluvia. La tecnología debería abordarse con la finalidad de que sea un medio efectivo y así alcanzar el desarrollo social y ecológicamente sustentable. También hay bastantes casos que mencionan la falta de capacidad humana como en conocimientos para planificar y gestionar.

c) Calidad de aguas: en el presente hay bastantes retos en la implementación en protección de los ecosistemas y de los sistemas de calidad del agua en el que se necesita financiamiento de las instituciones encargadas, también es necesario el desarrollo y la actualización de normas y reglamentos, la mejora de información y la experiencia limitada en la contabilización de la protección de los ecosistemas y de calidad del agua y la separación entre las regulaciones hídricas de usos del territorio.

d) Riesgos: Los distintos retos de la implementación con respecto a la gestión de riesgos afectan mayormente a los más pobres en el mundo. Entre los riesgos se incluyen la mejora y el acceso al financiamiento, insuficiencia de la mejora y actualización de tecnologías, falta de conocimientos y actualizaciones, mejoría de la gobernanza del agua con un énfasis en el recurso, incluir la participación de todos los sectores desde la comunidad hasta las instituciones gubernamentales en cuestión de agua y falta de información hidrológica.

Río Santiago, una región contaminada

El río Santiago es uno de los cuerpos de agua más importantes del occidente del país. Forma parte de la cuenca hidrológica Lerma-Chapala-Santiago, este nace en el lago de Chapala en Jalisco, tiene aproximadamente 475 km y desemboca en el estado de Nayarit en el Océano Pacífico. En Jalisco pasa por Poncitlán, Ocotlán, Atequiza, Juanacatlán, Atotonilquillo,

El Salto, Tonalá, etc. Guadalajara desde 1956 se abastece del río Santiago entre el 70 % y 80 % de sus necesidades hídricas (Duran y Torres, 2006).

Este río es uno de los más contaminados del país, la calidad del agua es afectada directamente por el desarrollo industrial que se conforma aproximadamente de 741 empresas las cuales no cumplen con el marco normativo y legal. Las industrias son de los giros metálicos, electrónica, química, plásticos, mueblerías y alimenticios (McCulligh C., 2012). Las industrias que mayor aportan aguas residuales son: Celanese mexicana, Ciba especialidades químicas, IBM de México, Nestlé, Industrias Ocotlán y Harinera de Maíz de Jalisco. Algunas industrias grandes cuentan con plantas de tratamiento, pero la mayoría no somete sus aguas residuales a ningún tratamiento. Se hizo un análisis de estas aguas por la Comisión Estatal de Agua y Saneamiento de Jalisco (CEAS), se mencionó que: las descargas de estos giros contienen elementos que son difíciles de remover y asimilar en los sistemas de tratamiento biológico y en los sistemas acuáticos. Son contaminantes que presentan alta resistencia a la degradación y son muy tóxicos para microorganismos y todos los seres vivos (McCulligh, et al., 2007).

La contaminación en el Río Santiago no es un tema nuevo, investigaciones realizadas por Durán y Partida (1990) en el corredor industrial de Jalisco, demostraba que la contaminación provenía principalmente del sur de la ciudad de Guadalajara. Hace más de 30 años se generaban aguas residuales urbanas e industriales que en su mayoría eran vertidas al río, con tratamiento, tratamientos deficientes o sin tratamientos. Las empresas que están en el corredor industrial descargaban sus aguas directamente en el río Santiago o en la presa del Ahogado. En los años 80, en el nacimiento del río Santiago y la presa Corona desechaban aguas residuales las poblaciones de Ocotlán y Poncitlán, además había una industria lechera y una de fibras. En el tramo de la presa Corona y el salto, vaciaban sus aguas al río los pueblos de Atotonilquillo y Atequiza y aparte 5 industrias (SEDUE, 1984). Para el año 2000 se calculaba que aproximadamente el 3 % de las industrias trataban sus aguas residuales y del total de descargas al menos un 14 % recibía algún tratamiento (Duran y Torres, 2009).

Se realizaron varios estudios por parte de la SEDUE en el estado de Jalisco y también en otros laboratorios contratados por las fábricas a las que se les efectuaban reportes que están enviados a la SEDUE sin necesidad de que fueran los inspectores solo para verificar la información enviada

por dichos industriales (Durán y Partida, 1990), los resultados consistieron en: a) la variable del pH rebasa en varios casos más del 9.0 permisible, b) la temperatura del agua en varios casos fue mayor a 30°C hasta los 53°C, c) los colores de las aguas residuales tenían varias tonalidades: azul, amarillo y verde, d) en el caso de sólidos suspendidos y grasas siempre que fueron analizadas excedieron el límite, e) para ese entonces no analizaban metales pesados.

De acuerdo con estos resultados, el río Santiago ya estaba fuertemente contaminado; era un río incapaz de soportar la vida acuática; era un río sin oxígeno disuelto, fuente de olores y con espuma de detergente. Debido a toda esta problemática el gobierno federal en 1989 hizo un convenio con varios estados (México, Querétaro, Michoacán, Jalisco y Nayarit) que se benefician del río, sin embargo, hasta la fecha ninguno de los estados mencionados se ha puesto en funcionamiento de tener el total de plantas de tratamiento solicitadas (Martínez y Hernández, 2009).

En 1997 el daño ambiental ya alcanzaba los mantos subterráneos, apenas se trataba el 20 % de las aguas residuales, había 30 fábricas que ya realizaban reciclaje de sus aguas, sin embargo, no eran suficientes 16 plantas de tratamiento ya instaladas en la cuenca Chapala – Santiago para tratar desechos generados por el desarrollo industrial – urbano (Durán y Torres, 2009).

En el año 2006 varias organizaciones sociales realizadas por habitantes de las más afectadas por la contaminación (El Salto y Juanacatlán) comenzaron a mostrar a la luz pública el desgaste del afluente y denunciaron los daños ocasionados a la salud. Varias instituciones llevan a cabo varias actividades para que las autoridades hagan caso, sin embargo, mencionan que prevalece la impunidad y la falta de soluciones. En el 2008 el gobierno construyó en la Cuenca de El Ahogado una planta de tratamiento para limpiar las aguas municipales, pero solo fue una medida parcial frente a la magnitud del problema (Martínez y Hernández, 2009).

En el 2007 se metió una presión social por la Comisión Estatal de los Derechos Humanos de Jalisco (CEDHJ) y se metió una queja solicitando estudios epidemiológicos, sin embargo, esos resultados nunca fueron entregados. En el 2009 la CEDHJ hizo una publicación dirigida al gobernador del estado, a los directores de la CEAS, al SIAPA, a varios presidentes municipales para que se realizara un monitoreo constante de calidad de

agua en el río, pero tampoco se entregaron los resultados (Martínez y Hernández, 2009).

La presa del Ahogado es una obra para almacenar agua específicamente para riego que beneficiaba 600 hectáreas, ubicada en El Salto, la principal fuente de contaminación eran las descargas residuales del aeropuerto Miguel Hidalgo, de la ciudad de Guadalajara, más dos industrias de aceite comestible y otra más de fertilizantes. En la zona de la presa y el río se disminuyó considerablemente la actividad agropecuaria por la pésima calidad del agua, producida por la gran cantidad de aguas residuales industriales sin tratamiento, que añadían sales y otras sustancias; esto provocó excesivas salinidades de suelos agrícolas, problemas de salud pública, cierre de áreas de recreación en las riberas del río y ya no se utilizó al río Santiago como fuente de abastecimiento para el poblado de Juanacatlán. La planta de tratamiento del área no era suficiente para tratar el agua que iba en el trayecto del río en ese punto, se podía notar una visible capa de grasa y aceites, esto impedía la autodepuración de las aguas y provocaba malas condiciones para la vida acuática y peligro para las personas adyacentes al río (Duran y Torres, 2009).

Las autoridades en cuestión de agua en el río Santiago afirman que la contaminación industrial es menor que la municipal y que las industrias si cumplen la normatividad; otra persona comento que el 20 % de las empresas incumplen normatividad que regula las descargas y que la CONAGUA no cuenta un número grande de inspectores para estar al pendiente de todas las descargas; ya que la región Lerma – Santiago – Pacífico abarca una superficie de 191 500 km², en donde habitan aproximadamente 8.6 millones de personas (INEGI, 2021) y se produce un 17.1 % del PIB nacional.

Otra causa más de contaminación en el río, son los lodos de las plantas de tratamiento industriales que se desechan dentro del cárcamo de bombeo del SIAPA, en el municipio de El Salto, en el canal de Las Pintas / El Ahogado, que también contienen aguas del drenaje de Guadalajara. En ese punto se pudo comprobar que empresas descargaban lodos industriales, ahí no hay plantas de tratamiento que eliminen residuos, por lo que los contaminantes de vierten directamente (McCulligh, et al., 2007).

En el agua del río Santiago se han detectado una gran cantidad de grasas, aceites, solidos disueltos, metales pesados (zinc, mercurio, benceno y arsénico), niveles altos de amoniaco y fosfatos que ocasionan hiperferti-

lización del medio, también se han encontrado una alta cantidad de coliformes fecales, a causa de todo lo que se ha encontrado en el río se llegó a la conclusión de que el agua no es apta para consumo humano ni mucho menos para uso agropecuario (Olcina, 2009).

La cantidad de materia orgánica que se descarga en el río rebasa su capacidad de depuración, ya que ocasiona la desaparición de oxígeno disuelto, flora y fauna (los cuales indican que son un cuerpo de agua sanos); los residuos industriales producen salinización de los suelos y degradan los nutrientes necesarios para el uso agrícola (Duran y Torres, 2006).

Problemática del río Santiago

En el río Santiago hay un mal uso del agua, lo que está alterando de forma alarmante del régimen hidrológicos y, por lo tanto, la calidad, la disponibilidad y temporalidad en la cuenca (Nilsson y Renöfält, 2008). También, la deforestación, los cambios de uso de suelo, el crecimiento urbano, las descargas residuales y el desarrollo de carreteras son una fuente indirecta que afecta gravemente la calidad y cantidad de agua disponible (Toledo, 2006, Postel y Ritcher 2003, Revenga, et al., 2000, Dynesius y Nilsson, 1994).

La mayor problemática se deriva de la canalización y desvió deliberado del río es la mala calidad del agua que es utilizada para regar terrenos agrícolas y el agua es revertida a este cuerpo de agua, regresa llena de sedimentos, pesticidas, fertilizantes y otros más compuestos utilizados en actividades agrícolas (Revenga, et al., 1998, Dynesius y Nilsson, 1994). Al igual la construcción de carreteras y la extracción ilimitada de aguas superficiales, modifican su cantidad, calidad y estacionalidad de sistemas fluviales (Jones, et al., 2000, Revenga, et al., 1998, Allan, et al., 1997). Otra problemática que altera la calidad, temporalidad y cantidad de agua del río es el crecimiento incontrolado de las ciudades y a su vez una gran demanda del recurso; la ZMG desecha sus descargas urbanas y las industrias sus aguas residuales directamente en el río, esto afecta la disponibilidad de agua no solamente en Guadalajara, sino que a nivel mundial (Revenga, et al., 2000, CONAGUA - SEMARNAT, 2008, Toledo, 2006). La contaminación del río afecta la biota, reduce la disponibilidad del recurso hídrico para los distintos usos de agua y aumenta enfermedades en las poblaciones humanas por exposición a sustancias, contaminación de alimentos por riego.

Importancia del río Santiago

Los ríos son una parte muy compleja dentro de los sistemas acuáticos, son muy importantes para el planeta ya que se encargan de la circulación y del transporte del agua mundialmente y lleva la escorrentía hacia el mar, la cual regresa hacia los continentes por la atmósfera para precipitarse sobre la tierra, gracias a este proceso la cantidad del agua se renueva constantemente en la tierra y sostiene la vida sobre la superficie terrestre. Los ríos no solamente llevan agua, sino que también influyen en otros ecosistemas estructurando cadenas tróficas y ciclos de nutrientes de una infinidad de organismos (Postel y Richter, 2003).

Los ríos intercambian materia y energía con las zonas ribereñas y las cuencas, permitiendo así el establecimiento de sistemas biodiversos como estuarios y humedales. Los sistemas fluviales son determinantes del ciclo hidrológico de la cuenca, influyendo directamente en la flora y fauna (Nilsson y Renöfält, 2008, Naiman, et al., 1993). Las zonas bajas y medias de las cuencas dependen de la cantidad y calidad de agua transportada por los ríos desde la cuenca alta (Jiménez, et al., 2005).

Del río Santiago se puede obtener varios servicios ambientales como la provisión del agua potable para uso y consumo humano, disminución de inundaciones, fertilidad de suelos, purificación de aguas residuales, distribución de nutrientes por toda la cuenca, mantenimiento del equilibrio salino de las zonas costeras, también es un lugar turístico y recreativo (Postel y Richter, 2003, Postel, 2000). El caudal ecológico del río Santiago tiene que ver con la calidad y cantidad de agua ya que este mantiene el funcionamiento y estructura adecuada y permite mantener a otros ecosistemas en donde hay una competencia por el uso de agua (Dyson, et al., 2003).

En el aspecto ecológico el río Santiago es importante por las siguientes razones:

- a) Mantiene la diversidad de los ecosistemas, diversidad de especies y diversidad genética.
- b) Mantiene la permanencia y equilibrio dinámico de los ecosistemas.
- c) Garantizan el funcionamiento adecuado del ciclo ecológico.
- d) Reaccionan adecuadamente a las características esenciales de la naturaleza.

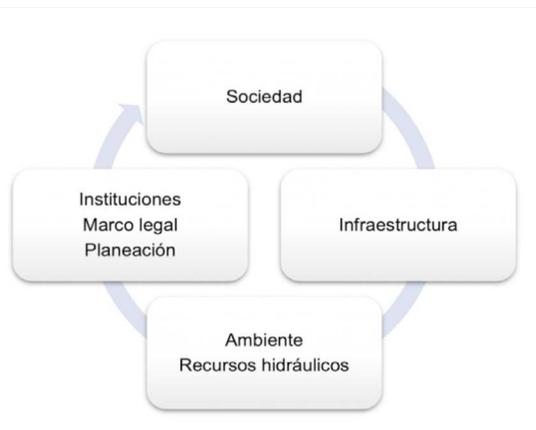
- e) Mantiene niveles adecuados de calidad y disponibilidad de bienes como el aire, el agua, el suelo, el clima y energía (Amartya, 2019).

Agua sustentable

Un componente muy importante en tema de sustentabilidad del agua es por medio de una explotación equilibrada tanto de agua superficial y subterránea en una región hidrológica con un límite y potencial que ha sido descrito en un documento (OECD, 1998) que menciona lo siguiente: “el hecho de relacionar extracción de agua versus su tasa de renovabilidad es un punto central”. A lo que se puede entender que es muy importante realizar una determinación de cuánta agua se puede extraer para que esta extracción se realice de forma sustentable en relación con el volumen total disponible, esto deberá establecerse al principio y al final de un periodo.

Bossel (1999) menciona que el desarrollo coevolución influye entre los humanos y sus sistemas naturales, en el tema de uso sustentable del agua se considera que los elementos son la sociedad y el agua, así que debe establecerse un sistema en el que se presente la interacción descrita anteriormente. Hay un modelo sistemático que une todos los componentes de un sistema sustentable y es el siguiente:

Figura 1
Componentes principales de un sistema sustentable



Fuente: Cervera, 2007.

El sistema anterior cuenta con varias etapas, considerándose esencial:

1. Sistema social: Crecimiento de la población, estructura de clases, distribución de ingresos, organizaciones y grupos sociales.
2. Gobierno: planeación y organismos operadores.
3. Infraestructura: red de drenaje y de agua potable, pozos, distribución de agua.
- 4 Recursos y ambiente: agotamiento, reciclamiento, contaminación y degradación del agua.

Con la finalidad de mitigar la escasez del agua, varios países han adoptado un enfoque de gestión integral de cuencas; el objetivo de esto es mejorar la administración y el manejo del recurso hídrico para poder resolver situaciones particulares de los usuarios involucrados en el proceso para que todos puedan participar efectivamente en la toma de decisiones, mejorando las bases de un manejo sustentable (Dourojeanni, Jouravlev y Chávez, 2002).

Para que la gestión del agua pueda ser sustentable, se debe asegurar que el líquido esté disponible, se debe dar acceso a todas las personas y para eso se deben mejorar las bases para que haya una administración financiera viable para que se establezcan condiciones asegurando el consumo a futuras generaciones. Para eso se debe buscar un equilibrio entre el consumo y la disponibilidad y realizar acciones para que el ciclo hidrológico y los recursos naturales permanezcan (Carabias y Landa, 2005).

La naturaleza es considerada como materia prima para producir servicios y bienes para satisfacer necesidades, tiene lugar un crecimiento que se basa en las acciones en distintos ámbitos: cultural, social, intelectual y económico, esto potencia el uso excesivo de los recursos naturales (Foladori, 1999). Se pone en riesgo la sustentabilidad de los recursos naturales debido a lo mencionado anteriormente la consecuencia de esto es limitar el desarrollo económico, la integridad de los ecosistemas y la estabilidad social. El capitalismo utiliza a la naturaleza como fuente inagotable, de forma gratuita para su único beneficio del desarrollo y crecimiento (Gutiérrez y González, 2010). De este uso excesivo se ocasiona la escasez, la contaminación, el agotamiento y el deterioro del agua (Barkin, 2006).

Los indicadores y el sistema del agua sustentable

Existe una forma de medir el uso sustentable del agua por medio de indicadores que midan la interacción entre la sociedad y el recurso de agua, estos indicadores dan información acerca de los sistemas que dan forma al desarrollo sustentable y se necesitan para guiar políticas y ayudar en la toma de decisiones en varios niveles de la sociedad. Menciona Bossel (1999) varias características que deben tener los indicadores:

- a) Representaran problemas importantes en la interacción de los sistemas y su ambiente.
- b) Deberán ser claros, compactos cubriendo los aspectos más relevantes.
- c) El indicador deberá ser participatorio para asegurar que tenga visiones y valores de la comunidad o región para la cual se desarrollan.
- d) Deben ser claros, definidos, reproducibles, no ambiguos y prácticos.

Deberán ayudar a deducir la viabilidad y sustentabilidad de desarrollos actuales para que permitan compararse con proyectos alternos. Estos indicadores deberán revelar cuales son las limitaciones físicas y humanas para el manejo sustentable del agua en ciertas regiones. En las restricciones físicas los indicadores dan cuenta de la capacidad del sistema natural para ofrecer el recurso, así como la tasa de renovabilidad del agua en las zonas de captación.

Dentro del sistema anteriormente mencionado se considerará un número compacto de indicadores que cubran los componentes y su interacción. Los indicadores ayudaran a deducir la viabilidad y sustentabilidad del desarrollo actual, con la finalidad de evaluar los componentes sociales y ambientales de un desarrollo sustentable. Los indicadores de Bossel (1999) subdivide en indicadores de presión, estado y respuesta. Se describen a continuación:

- **Indicadores de presión:** Miden la presión en el ambiente que ha sido afectado por la actividad humana.
- **Indicadores de estado:** Miden la calidad del ambiente y la cantidad de recursos naturales, efectos en la salud y en los ecosistemas ocasionados por el deterioro ambiental.

- **Indicadores de respuesta:** Miden los esfuerzos de la sociedad para responder a cambios ambientales.

Elementos necesarios para una gestión sustentable del agua

La gestión sustentable se relaciona con un servicio eficiente en su administración y operatividad, para satisfacer de manera neutral a los usuarios, pero también con factores ambientales que permitan conservar a los ecosistemas la permanencia del ciclo hidrológico. A continuación, se describen varios aspectos de la sustentabilidad:

• Aspecto ambiental

La gestión del agua será sustentable cuando se contemplen los requerimientos del ecosistema, la influencia de las actividades humanas en el régimen del flujo y la incompatibilidad de las necesidades ambientales y humanas. Esto se puede conseguir por medio de un trabajo en conjunto son todos los sectores sociales, con base en gestión del agua que permitan hacer una base de información para la toma de decisiones acerca del diseño e implementación que junte todos los intereses del ecosistema y de los sectores (Mathews, 2005).

En el país, la conagua toma las decisiones de la gestión del agua a nivel nacional, avalado por los consejos de la cuenca. Los procesos de conciliación y acuerdos entre los usuarios y los usos son muy complejos, debido a la diversidad y cantidad de usuarios y de usos del agua, que en ocasiones se pierde la operatividad. La ausencia de un reglamento para la distribución y uso del agua en las cuencas, afecta el entorno ambiental y social (CONAGUA, 2010).

• Calidad del agua

Otro aspecto de la gestión sustentable aplica en la calidad del agua (Biswas, 2007). Biswas hace mención de que no se puede hacer gestión sustentable si no se agregan aspectos relacionados con la calidad del recurso hídrico.

En México hay problemas relacionados con el deterioro del agua, por lo cual no es posible conocer con exactitud por falta de información de los acuíferos, de instrumentos para hacer un diagnóstico confiable y al uso de tecnologías de saneamiento insuficientes (Carabias y Landa, 2005). La calidad del agua se puede visualizar desde dos ángulos:

1. El agua suministrada por medio de la red de distribución del organismo operador deberá ser de buena calidad conforme lo menciona la Norma Oficial Mexicana NOM-179-SSA1-1998.
2. Del agua que vuelve de las fuentes receptoras al completar el ciclo de utilización, una parte presenta contaminación por parte de las descargas industriales y urbanas que provienen de descargas residuales, añadiendo la contaminación por la actividad agrícola. Las descargas industriales y urbanas deben cumplir con las normas NOM-001-SEMARNAT-1996 y NOM-002-SEMARNAT-1996, estas normas regulan las descargas de aguas residuales en los cuerpos de agua del país (CONAGUA, 2010).

• Aspecto social

El aspecto social de la sustentabilidad, la gestión será sustentable cuando sea equitativa, implicando que los usuarios paguen la parte proporcional del servicio de agua que reciben (Boland, 1993). Es muy importante que el acceso a un agua de calidad para consumo humano se considere como un derecho, independientemente del pago de las personas, esto reviste un importante esquema de subsidios cruzados que permiten que los usuarios efectúen un pago justo pero ajustado a su economía (Rogers, et al., 2002).

Respecto al sector no urbano, la gestión del agua en México no es equitativa porque las comunidades rurales o zonas marginadas no disponen del servicio ya que no están conectados a la red de distribución (Rogers, et al., 2002). Collado (1999) hace mención de que el incumplimiento de las leyes por falta de reglamentos y la corrupción existente en el país, explican en parte de los problemas de inequidad en acceso a servicios del agua. También Biswas (2007) mencionada que los marcos institucionales y legales no son los convenientes para el país, ya que estos son muy limitados.

• Aspecto financiero

Este aspecto también es importante para tener una gestión sustentable. En el país la inversión en infraestructura se aplica mediante la Comisión Nacional del Agua y los gobiernos municipales, sin embargo, hay una gran necesidad de una fuerte inversión para la modernización, creación y mantenimiento de las redes de distribución ya que esto limita a los organismos públicos a brindar un servicio eficiente. En México los sistemas de agua no son sustentablemente financieros por los costos ambientales, estos se dividen entre varias instancias: Semarnat, Conagua, Profepa. Conafor, entre otras más estos solventan costos del mantenimiento ambiental de forma independiente, pero tampoco se agregan los costos de oportunidad del uso del agua para diversos fines (Monforte, et al., 2012).

Gestión y planificación del agua

La acción pública debe promover la estrategia, la planificación hidrológica y la gestión del agua en todos sus ciclos, como bien económico, social y ambiental, manteniendo las cuencas hidrológicas evitando la escasez permanente o los excesos temporales del agua. La planificación hidrológica debe ser aplicada en todo el mundo y concordar con el resto de las planificaciones económicas y sectoriales, con el objetivo de aumentar la disponibilidad del recurso hídrico para el desarrollo sustentable, mejorar su calidad y racionalizar sus usos. La planificación hidrológica mejora los desequilibrios sectoriales, territoriales y la calidad de vida, con carácter de permanencia, introduciéndose en la participación de los interesados en los usuarios e interesados (Sancho, 2015).

Para esta planificación se necesitan estudios técnicos para la relevancia normativa para configurar los ordenamientos sobre el agua. Como reflexión adicional mencionada por Sancho (2015) sobre la planificación hidrológica se puede añadir:

- El agua deberá ponerse en servicio de más necesidades del hombre de la sociedad, acompañándose de forma especial de la energía y la alimentación.
- Los procesos de la planificación son una garantía para la aplicación de

medidas efectivas. Deberá ajustarse el alcance de los mismos y respetarse el papel propietario de los usuarios del agua, estos deben colaborar en la resolución de problemas y gestión de las medidas que se lleguen a plantear.

- Las medidas y los estudios de planificación y gestión deberán desarrollarse por profesionales en el área con equipos interdisciplinarios, pero liderados por personas que entiendan más el tema del agua.
- La planificación hidrológica debe basarse en un análisis detallado para tomar decisiones con base en modelos ya existentes que permitan el avance del desarrollo en la sociedad y el medioambiente.

Técnicas e instrumentos para la sustentabilidad del agua

La evaluación de los recursos hídricos es muy importante para la toma de decisiones de políticas ambientales e hídricas. El uso económico del agua exige aplicar instrumentos, en los que se debe tomar en cuentas costos financieros, ambientales, económicos con la finalidad de alcanzar un uso eficiente y sostenible.

La sustentabilidad es una responsabilidad agrupada e individual por el mantenimiento de dichos bienes. La huella hídrica (HH) es un indicador del uso del agua (Victoria, 2018), este indicador fue creado para mapear el impacto del consumo humano de agua dulce, este relaciona el agua con el consumo en todos los niveles de población (Vázquez del Mercado y Buenfin, 2012). La huella hídrica es el volumen de agua necesaria para la elaboración de servicios y productos consumidos por la población o por actividades humanas. Este indicador aproxima el volumen de agua contaminado o consumido para producir un producto. A partir de esta información es posible evaluar los impactos sociales, ambientales y económicos que implican el consumo de agua (Ferrer y Viegas, 2014).

Para utilizar la huella hídrica se tiene en cuenta tres tipos de agua: verde, azul y gris. Los cultivos necesitan agua, esta agua proviene de la precipitación absorbida del suelo o agua verde y cuando esta no es suficiente, del aporte extra en forma de riego o agua azul. El agua que no utiliza la planta se infiltra y vuelve a los cuerpos de agua. La disponibilidad de agua en el suelo y la evapotranspiración dependerá de diferentes factores, edáficos, fisiológicos y climáticos. La huella hídrica verde se conoce como el consu-

mo de agua acumulada en el suelo que viene de la precipitación, satisface la demanda sin mediación humana, es importante para la agricultura y se refiere a la evapotranspiración del agua de lluvia total y el agua incorporada a la cosecha (Vázquez del Mercado Arribas y Buenfin Rodríguez, 2012).

Para cuantificar este tipo de huella hídrica es necesario tomar datos climatológicos todos los días para hacer un seguimiento en la precipitación, para contar con el nivel de agua de lluvia y cuantificar el total de la evapotranspiración (Victoria, 2018). La huella hídrica azul es el consumo de agua que es extraída de una fuente superficial o subterránea para satisfacer la demanda de agua no satisfecha por causa de una deficiencia en la disponibilidad de agua que proviene de la lluvia, necesita de intervención humana para ser distribuida. Esta agua no vuelve a la cuenca de la que fue extraída; en la agricultura se hace un seguimiento en la producción (Victoria, 2018).

La huella hídrica gris es el volumen de agua dulce que asimila la carga de contaminantes por parte de un cuerpo receptor, relacionando los límites de normas establecidas a una buena calidad para el ambiente y las personas. Es el agua que se necesita para disminuir la concentración de contaminantes hasta que llegue el punto en que la calidad del agua se encuentre por encima de las normas establecidas de calidad de agua. Para cuantificar la huella hídrica gris se monitorea continuamente la calidad del agua de los sistemas evaluados (Vázquez del Mercado y Buenfin, 2012).

La huella hídrica tiene una relación directa entre el consumo humano y los sistemas hídricos con los cuales se pueden determinar factores como la contaminación del agua, la escasez y permite mejorar la producción y gestión del agua; también es muy importante para el cuidado del medioambiente; además, cuantifica la magnitud de la calidad de agua utilizada y los riesgos a los que se enfrenta un sistema productivo, con la finalidad de generar conciencia de como y donde se debe utilizar el recurso hídrico para manejar y gestionar procesos del recurso hídrico (Victoria, 2018).

Se puede evaluar la sustentabilidad ambiental en las cuencas por medio de la huella hídrica en un tiempo determinado, este proceso se define como el cociente entre el total de las huellas hídricas verde a la disponibilidad de agua verde. La disponibilidad de agua verde se conoce como la evapotranspiración de la tierra que se utiliza para la vegetación natural sin incluir la evapotranspiración de la tierra improductiva, entonces, el indicador de sustentabilidad de agua verde es la fracción del agua verde disponible.

Para evaluar la sustentabilidad ambiental de la huella hídrica azul en una cuenca en cierto tiempo, se deberá hacer una comparación del causal consumido con el caudal disponible (escorrentía natural menos el requerimiento de flujo ambiental). González (2012) menciona que la huella hídrica azul y verde permiten:

- 1) Ayuda a establecer políticas ambientales del uso de agua para tener un mayor control del recurso.
- 2) Identifica oportunidades para mejorar el desempeño ambiental para la toma de decisiones estratégicas. El agua para ser sustentable con el medioambiente no deberá exceder los límites máximos sustentables del recurso. Los impactos ambientales que se incluyen en la evaluación de sustentabilidad de la huella hídrica, se pueden identificar impacto en el flujo del agua comparándose con las condiciones naturales.

La sustentabilidad consiste en medir la huella hídrica con el objetivo de planificar los bienes y servicios ambientales, en un esquema de ordenamiento territorial y en la cuenca hidrologica. La huella hidrologica es un indicador sustentable que permite identificar impactos (Victoria , 2018).

Gestión del río Santiago

La contaminación del río Santiago conlleva una serie de factores que se perciben como independientes que necesitan una visión integral desde el territorio el cual permite gestionar la cuenca entera, por medio de todos los factores y actores que contribuyen de forma indirecta o directa con la recuperación de la cuenca. Esta visión tiene el objetivo de contar con ríos sanos para trabajar en toda la cuenca y aprovechar el recurso natural y las prácticas productivas sean sustentables para poder controlar la contaminación.

La sustentabilidad del río Santiago implica el equilibrio entre los factores económico, social y ambiental para el bienestar social y su permanencia para las futuras generaciones. La problemática del río es muy compleja, resulta indispensable elaborar una estrategia a largo plazo en la cual se consideren a todos los sectores que intervienen en la recuperación del río e incluir todos los elementos que se involucren en su solución: la salud ciu-

dadana, la gobernanza, el patrimonio natural, el desarrollo económico, la infraestructura y el marco legal. Todo esto se lleva a cabo por distintas secretarías y deben trabajar de forma coordinada para lograr un objetivo común (Coordinación General Estratégica de Gestión del Territorio, 2023).

Para la preservación del río Santiago se incluyeron varios programas, se ayuda a mejorar las condiciones ambientales, sociales y ambientales en las zonas afectadas por los grandes niveles de contaminación; se han seguido distintos ejes de gobernanza enfocándose en las estrategias de acción para que se pueda lograr, por lo tanto, se determinaron cuatro criterios para la inclusión en el proyecto:

- Plantas de tratamiento
- Agua limpia
- Infraestructura hidráulica
- Recuperación integral

Para que se lleve a cabo esta recuperación y saneamiento se necesita tiempo y la transición camino hacia la sustentabilidad de la cuenca por la dimensión del río Santiago es un reto que mira hacia el 2050, dándosele continuidad a la estrategia.

Conclusión

En el río Santiago descargan aguas industriales y residuales de la ZMG desde hace más de 30 años. Hay una insuficiencia y un claro manejo ineficaz de los planes de saneamiento y gestión del río. Desde 1990 distintos esfuerzos empresariales y municipales han tratado de resolver el problema, sin embargo, se justifican social y económicamente en la conservación de la calidad de vida y de los ecosistemas a largo plazo. Con todo esto se puede afirmar que se le da muy poca atención a la integración de las políticas del control de aguas residuales, a la calidad del agua y la contaminación de la cuenca. Esta situación ambiental ha generado la aparición de varias enfermedades, algunas graves, a los habitantes adyacentes al río Santiago.

En este capítulo se realizó el análisis de los elementos más importantes para que se pueda llevar a cabo una gestión sustentable del agua en el río Santiago, en el que se puede observar que para que la sustentabilidad se lle-

ve a cabo es necesario seguir una serie de pasos: que exista financiamiento, cuidado del medioambiente, que se lleve a cabo una participación social y que las autoridades correspondientes en cuestión de agua se reúnan para llegar a acuerdos y esos acuerdos se lleven a cabo.

Para evaluar la sustentabilidad de la gestión del agua se utilizó el río Santiago ya que es una zona de interés por su alto nivel de demanda, una baja disponibilidad de agua en la región, es muy importante hacer monitoreos constantes en el río para poder saber cuál es la calidad de agua que tiene, para poder tomar medidas adecuadas de solución, esto con la finalidad de que el río sea sustentable y en nuestro presente se puedan satisfacer necesidades sin afectar la capacidad del futuro y garantizar un equilibrio económico, cuidando el bienestar social y el medioambiente.

Referencias bibliográficas

- Allan, D. J., Donna, L. E., & Fay, J. (1997). The influence of catchment land use on stream integrity across multiple spatial scales. *Freshwater Biology*, 149-161. <https://doi.org/10.1046/j.1365-2427.1997.d01-546.x>
- Amartya. (2019). *Promoviendo Sustentabilidad*. <https://www.idealista.org/es/ong/71eacf03be0a47808e0c523d52e68786-amartya-promoviendo-sustentabilidad-villa-crespo>
- Barkin, D. (2006). *La gestión del agua urbana en México: retos, debates y bienestar*. Guadalajara:
- Biswas, A. (2007). *¿A dónde va el mundo del agua? Obtenido de Firmemos la paz con la tierra:*
- Boland, J. (1993). Pricing Urban Water: principles and Compromises. *Journal of Contemporary Water Research and Education*, 7-10. <https://openstax.org/l/viewcontent.cgi?referer=&httpsredir=1&article=1420&context=jcwre>
- Bossel, H. (1999). *Indicators for Sustainable Development: Theory, Method, Applications*. Winnipeg: International Institute for Sustainable Development. <https://www.iisd.org/publications/indicators-sustainable-development-theory-method-applications>
- Carabias, J., & Landa, R. (2005). *Agua, medio ambiente y sociedad. Hacia la gestión integral de los recursos hídricos en México*. México: UNAM / El Colegio de México / Fundación Gonzalo Río Arronte.

- Carabias, J., & Landa, R. (2005). *Agua, medio ambiente y sociedad. Hacia la gestión integral de los recursos hídricos en México*. México: UNAM.
- Cervera-Gómez, L. E. (2007). *Indicadores de uso sustentable del agua en Ciudad Juárez, Chihuahua. Estudios fronterizos*. https://www.scielo.org.mx/scielo.php?pid=S0187-69612007000200001&script=sci_abstract
- Collado, J. (1999). *Marco legal para el manejo de cuencas en México*. México: IX Congreso Nacional de Irrigación.
- Coloquios del siglo XXI: ¿cuál será el futuro del planeta y de la especie humana?: <https://thirdworldcentre.org/mundoaguaakb.pdf>
- CONAGUA (2010). *Estadísticas del agua en México*. México: Conagua/Semarnat.
- CONAGUA (2010). *Estadísticas del agua en México*. México: Conagua/Semarnat.
- CONAGUA-SEMARNAT (2008). *Informe de la situación del medio ambiente en México*. México: Comisión Nacional de Agua-Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales.
- Coordinación General Estratégica de Gestión del Territorio. (2023). *Recuperación del Río Santiago*. Guadalajara: Gobierno del Estado de Jalisco.
- Dourojeanni, A., Jouravlev, A., & Chavez, G. (2002). *Gestión del agua a nivel de cuenca: teoría y práctica. Serie Recursos Naturales e Infraestructura*. Santiago de Chile: Naciones Unidas.
- Durán Juárez, J. M., & Torres Rodríguez, A. (2009). *La sustentabilidad de la cuenca del Río Santiago y su relación con la metropolización de Guadalajara*. *Cultura, Tecnología y Patrimonio*, 5-30.
- Durán Juárez, J. M., & Partida Rocha, R. (1990). *Empresas y contaminación ambiental. El caso del corredor Industrial de Jalisco*. *Revista de Ciencias Sociales*, (13), 7-45. Universidad de Guadalajara.
- Durán Juárez, J. M., & Torres Rodríguez, A. (2004). *Los costos ambientales del abastecimiento de agua a las ciudades. El caso de la Zona Metropolitana de Guadalajara, algunas reflexiones sobre el abastecimiento a la ZMG y el proyecto de Arcediano*. *Chapala, Jalisco*.
- Duran, J. M., & Torres, A. (2009). *La sustentabilidad de la cuenca del río Santiago y su relación con la metropolización de Guadalajara*. *Cultura, Tecnología y Patrimonio*, 5 - 30. <https://biblat.unam.mx/hevila/Culturatecnologiay-patrimonio/2009/vol4/no7/1.pdf>

- Duran, J. M., & Torres, A. (2006). *¿Agua para Guadalajara? En BARKIN D,* (coordinador). La gestión del agua urbana en México. Retos, debates y bienestar. Guadalajara: Universidad de Guadalajara.
- Dynesius, M., & Nilsson, C. (1994). *Fragmentations and flow regulation of river systems in the Northern third of the World. Science*, 753-762. <https://www.science.org/doi/10.1126/science.266.5186.753>
- Dyson, M., Bergkamp, G., & Scanlon, J. (2003). *Flow. The essentials of environmental flows.* UK: UICN.
- Fernández Cirelli, A. (2012). El agua: un recurso esencial. *Química viva*, 11(3), 147-170. <https://www.redalyc.org/pdf/863/86325090002.pdf>
- Ferrer, M., & Viegas, M. (2014). *Huella hídrica: la nueva norma internacional ISO 14046: 2014 y su implementación.* CONAMA. Congreso Nacional de Medio Ambiente.
- Foladori, G. (1999). Los límites del desarrollo sustentable. *Trabajo y capital*, 135-158.
- González Reyes, L. (2012). La sostenibilidad parte de la gestión de los bienes comunes. *Revista de Información y Debate.* <http://www.revistapueblos.org/old/spip.php?article2502>
- Gutiérrez, E., & González Gaudiano, E. (2010). *De las teorías del desarrollo al desarrollo sustentable.* México: Siglo Veintiuno Editores.
- INEGI (2021). Principales resultados por localidad (ITER). *Censo de población y vivienda 2020.*
- Jiménez, J. A., Cavo, J., Pizarro, F., & Gonzalez, E. (2005). *Conceptualización de caudal ambiental en Costa Rica: determinación inicial para el Río Tempisque.* Costa Rica: UICN. <https://iucn.org/es/content/conceptualizacion-de-caudal-ambiental-en-costa-rica>
- Jones, J. A., Federick, J. S., Beverly, C., & Wemple & Kai, U. (2000). Effects of roads on hydrology, geomorphology, and disturbance patches in stream networks. *Conservation biology*, 14(1), 76-85. https://www.researchgate.net/publication/227626455_Effects_of_Roads_on_Hydrology_Geomorphology_and_Disturbance_Patches_in_Stream_Networks
- Journal of Contemporary Water Research and Education*, 131, 60-65. McCulligh DeBlasi, C., Paez. <https://citeseerx.ist.psu.edu/document?repid=rep1&type=pdf&doi=72ff8bec9a2492e0addcd23b303b47b4d2725ca7>

- Maestu, J. (2015). Agua y desarrollo sostenible: aplicación de los objetivos de desarrollo sostenible relacionados con el agua. La Relevancia de la tecnología. *Water Monographs*, 4-11. https://www.un.org/spanish/waterforlifedecade/pdf/WM_IIIESP.pdf
- Martínez González, P., & Hernández, E. (2009). Impactos de la contaminación del Río Santiago en el bienestar de los habitantes de El Salto. *Espacio Abierto*, 709-729. <https://www.redalyc.org/pdf/122/12211871006.pdf>
- Martínez Valdés, Y., & Villalejo García, V. M. (2019). Ecohidrología - Ecohidráulica: claves para la gestión integrada de los recursos hídricos. *Ingeniería hidráulica y ambiental*, 40(2), 95-109. http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_abstract&pid=S1680-03382019000200095
- Mathews, R. (2005). A Six-Step Framework for Ecologically Sustainable Water Management.
- McCullingh, C., Tetreault, D., & Martinez - González, P. (2012). Conflicto y contaminación: el movimiento socioecológico en torno al río Santiago. En H. Ochoa - García, & B. Hans – Joachim, *Gobernanza y gestión del agua en el occidente de México: la metrópoli de Guadalajara* (págs. 129 - 172). Guadalajara: ITESO.
- Monforte García, G., Aguilar Benitez, I., & González Gaudiano, E. (2012). Limitaciones de sustentabilidad de una gestión sectorizada para la sustentabilidad del agua: caso Monterrey, México. *Bitácora Urbano Territorial*, 20(1), 53-63. <https://www.redalyc.org/pdf/748/74824041006.pdf>
- Naiman, R. J., Decamps, H., & Poolock, M. (1993). The role of riparian corridors in maintaining regional biodiversity. *Ecological Applications*, 3(2), 209-212. <https://www.jstor.org/stable/1941822>
- Nilsson, C., & Renöfält, B. M. (2008). Linking flow regime and water quality in rivers: a challenger to adaptative catchment management. *Ecology and Society*, 13(2), 12-18. https://www.researchgate.net/publication/283863859_Linking_Flow_Regime_and_Water_Quality_in_Rivers_a_Challenge_to_Adaptive_Catchment_Management
- Nuñez Miranda, B. (1999). Guadalajara una visión del siglo XX. Zapopan, Jalisco, Guadalajara.
- OECD (1998). *Toward Sustainable Development: Environmental Indicators*. Francia: OECD. https://www.oecd-ilibrary.org/environment/towards-sustainable-development_9789264163201-en

- Olcina Alvarado, M. (2009). Ecologista en acción. *Revista el ecologista*. <https://www.ecologistasenaccion.org/revista/>
- Pedrozo Acuña, A. (2022). Sustentabilidad y ética: pilares de la nueva gestión del agua. En SEMARNAT, *Reflexiones para la sustentabilidad hídrica* (pp. 27-29). México. <https://www.gob.mx/imta/articulos/sustentabilidad-y-etica-pilares-de-la-nueva-gestion-del-agua?idiom=es>
- Postel, S., & Richter, B. (2003). *Rivers for life. Managing water for people and nature*. E.E.U.U.: Island press.
- Postel, S. (2000). Entering an era of water scarcity: the challenges ahead. *Ecological applications*, 10(4), 941-948. <https://www.jstor.org/stable/2641009>
- Revenge, C., Brunner, J., Kassem, K., & Payne, R. (2000). *Pilot Analysis of Global Ecosystems. Freshwater Systems*. Washington: World Resources Institute. <https://www.wri.org/research/pilot-analysis-global-ecosystems-freshwater-systems>
- Revenge, C., Murray, S., Abramovits, J., & Hammond, A. (1998). *Waters of the World. Ecological value and Vulnerability*. Washington: World Resources Institute. <https://www.wri.org/watersheds-world>
- Rogers, P., De Silva, R., & Bhatia, R. (2002). Water is an economic good: How to use prices to promote equity, efficiency, and sustainability. *Water policy, World Water Council*, 4(1), 1-17. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1366701702000041>
- Sancho Marco, T. A. (2015). Agua y desarrollo sostenible: retos para la ingeniería civil. *Water Monographs*, 54-67.
- SEDUE. (1984). *Evaluación de la calidad del agua del río Santiago*. Guadalajara.
- Toledo, A. (2006). *Agua, hombre y paisaje*. México: SEMARNAT - INE.
- Trombulak, S. C., & Frissell, C. A. (2000). Review of ecological effects of roads on terrestrial and aquatic communities. *Conservation Biology*, 18-30. <https://conbio.onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1046/j.1523-1739.2000.99084.x>
- UNESCO. (2012). Seguridad hídrica: respuestas a los desafíos locales, regionales y mundiales”,
- Universidad de Guadalajara. *Programa Hidrológico Internacional (PHI), Octava Fase, Plan Estratégico*. París, Francia: PHI-VIII 2014-2021.
- Vázquez del Mercado Arribas, R., & Buenfin Rodríguez, M. O. (2012). *Huella hídrica de América Latina: retos y oportunidades*. Aqua - LAC.

- Victoria, M. A. (2018). *Sustentabilidad ambiental del agua de riego como bien común a partir de la huella hídrica*. IV Curso de Posgrado sobre Derecho Agrario y Ambiental y Jornada Internacional CUIA-UNLP (p. 18). Argentina: UNSE.
- Vieyra, J. C., & Moya Garcia, G. (2007). *Mártires del Río Santiago*. Guadalajara: Agencias de Cooperación Internacional EDD y Misereor.
- WWAP. (2018). *Informe mundial de las Naciones Unidas sobre el desarrollo de los recursos hídricos 2018: soluciones basadas en la naturaleza para la gestión del agua, programa mundial de las naciones unidas de evaluación de los recursos hídricos/ONU-agua*. París, Francia: Org. de Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura (UNESCO).

Eje **2**

Nuevas tendencias

Capítulo 2.1

Sustentabilidad agroalimentaria: preservación Isocórica y el trinomio agua- energía-alimentos

*Abril Adriana Angulo Sherman¹
Blanca Rocio Serafín García²
Espicio Monteros Curie³*

<https://doi.org/10.61728/AE24004282>



¹ Profesora investigadora del Departamento de Estudios del Agua y de la Energía del Centro Universitario de Tonalá de la Universidad de Guadalajara. e-mail: abril.angulo@academicos.udg.mx

² Estudiante de la Licenciatura en Ingeniería en Energía, Centro Universitario de Tonalá. e-mail: blanca.serafin4237@alumnos.udg.mx

³ Profesor investigador del Departamento de Ciencias Básicas y Aplicadas del Centro Universitario de Tonalá de la Universidad de Guadalajara. e-mail: espicio.monteros@academicos.udg.mx

Introducción

La población mundial incrementa constantemente y en conjunto la demanda para cubrir sus necesidades básicas. Esto incluye a los alimentos, que son recursos imprescindibles para las poblaciones, la distribución de alimentos a nivel global no es equitativa y en muchos casos se requiere del uso de tecnologías para poder llevar los mismos desde su lugar de producción a un destino dónde serán consumidos (FAO, 2012). Entre estas tecnologías es importante considerar las relacionadas con su almacenamiento prolongado, algunas de ellas consisten en poder almacenar a temperaturas más frescas los productos con el propósito de inhibir el proceso de descomposición natural de los alimentos (Energy, S., 2012).

Ocasionalmente el rango de temperatura utilizando para su preservación se extiende por debajo de los 0°C , sin embargo los procedimientos que se siguen para alcanzar este rango implican el uso de sustancias con propiedades anticongelantes; que pueden ser tóxicas, y unidades de presurización y enfriamiento especializadas, todo lo anterior conlleva un incremento en los costos asociados al alimento (Energy, S., 2012). Además, derivado de la presencia de cristales de hielo intracelulares y extracelulares es posible que algunos aspectos asociados a la calidad de los alimentos y sus propiedades organolépticas se vean afectados (Angulo, A., 2014; Coriell, L. et al., 1964), dando como resultado un producto de menor calidad comparado con un alimento fresco.

La mejora en tecnología de esta área se encuentra en continuo desarrollo para lograr procesos que brinden tanto calidad como un bajo costo energético (Energy, S., 2012). En particular, teóricamente el proceso de preservación isocórica podría ofrecer productos de calidad, reduciendo el costo energético, lo anterior porque el rango de temperatura para un proceso isocórico se encuentra entre los 0 y -20°C , en particular, los mejores resultados para los alimentos se han encontrado en el rango de 0°C a -8°C , valores que se alejan de la temperatura de un congelador ($<-18^{\circ}\text{C}$) y pudieran representar un ahorro significativo (Chavez-Quesada, J. y Acos-

ta-Montoya, O., 2023; Dhanya, R. et al., 2023). Además, en el caso de los alimentos pueden reducir el uso de algunos insumos químicos que se requieren durante la congelación de alimentos. De esta manera, desarrollando conocimiento sobre ciencia del agua y su comportamiento anómalo es posible mejorar la calidad durante la preservación de los alimentos, mientras se mejora la eficiencia energética. Así, se establece la relación de estos contenedores y el trinomio Agua-Energía-Alimentos, y se evidencia como estos contenedores y su aplicación en la preservación isocórica de alimentos promueve el desarrollo sostenible.

El trinomio agua-energía-alimentos

Al hablar del trinomio agua-energía-alimentos, se hace referencia a la interdependencia y conexión que existe entre tres recursos fundamentales para el desarrollo sostenible (agua, energía y alimentos). Estos recursos se encuentran vinculados estrechamente entre sí, de tal manera que las acciones ejercidas en alguno de ellos, pueden tener impacto sobre las otras dos. Es por ello por lo que su gestión debe realizarse de forma integral para abordar desafíos globales como la seguridad alimentaria.

Las interconexiones entre los recursos del trinomio pueden ser cuantiosas, sin embargo, en este capítulo es importante enfocarnos en los siguientes aspectos:

- a) Es importante destacar la creciente demanda de estos recursos por parte de la población mundial; cuyo incremento va de la mano con el crecimiento de la misma (FAO, 2012; Rios, M., y Kaltschmitt, M., 2013).
- b) El agua no solamente es requerida para la producción de los alimentos, sino que es comerciada de manera indirecta a través de muchos de ellos.
- c) La eficiencia energética en la cadena alimentaria es esencial, en función de que su producción, procesamiento y distribución requieren energía; en este trabajo nos enfocaremos en aspectos particulares del almacenamiento y distribución de los mismos (Energy, S., 2012).
- d) Los alimentos ven afectada su calidad y propiedades organolépticas con el paso del tiempo como consecuencia natural del envejecimiento, lo que implica que no poseen la misma calidad que el producto original, los procesos asociados a su almacenamiento y distribución pretenden retardar el envejecimiento y mantener su calidad, sin embargo la calidad dependerá del método de preservación elegido, incluyendo aquellos que implican el

uso de aditivos y sustancias que pueden resultar perjudiciales a la salud (Energy, S., 2012).

El Hambre Cero

Los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), representan los desafíos globales que existen y que mundialmente deben ser atendidos de manera que sea posible desarrollar un equilibrio entre el desarrollo económico, social y ambiental (Naciones Unidas, 2015-a). Entre ellos es posible encontrar como segundo ODS al Hambre Cero, que promueve lograr la seguridad alimentaria, la nutrición mejorada y la promoción de la agricultura sostenible; este objetivo, refleja como el hambre y la malnutrición son problemas complejos que requieren enfoques integrales y sostenibles (Naciones Unidas, 2015-b). La atención del segundo ODS requiere una propuesta de solución que vaya más allá de garantizar la disponibilidad de alimentos y considere en detalle los aspectos relacionados a su producción, almacenamiento y distribución al usuario final, además de como la calidad de los alimentos se ve afectada con el paso del tiempo desde su obtención en el campo hasta llegar a las manos del consumidor.

Entre las alternativas para la preservación de alimentos podemos encontrar aquellos que pretenden retardar o inhibir su degradación a través del control de temperatura; la refrigeración y la congelación. La primera consiste en almacenar los alimentos en bajas temperaturas por encima de los 0°C, lo que ralentiza el crecimiento de bacterias y microorganismos que causan la descomposición. La segunda permite almacenar los alimentos en temperaturas por debajo de los 0°C inhibiendo el crecimiento de bacterias y la actividad enzimática, lo que permite un almacenamiento por períodos más prolongados comparada con la refrigeración (Energy, S., 2012). La elección de estos procesos de preservación en frío depende del tipo de alimento que se pretende conservar, la duración del almacenamiento y las características esperadas para el producto final; para ilustrar mejor las diferencias entre ambas, se presenta una tabla comparativa de algunas características relevantes de ambos procesos.

Tabla 1

Cuadro comparativo entre el proceso de refrigeración y el de congelación

Características	Refrigeración	Congelación
Temperatura de almacenamiento	Alrededor de 0-4°C	Menos de -18°C
Retención de nutrientes	Retiene mejor los nutrientes en comparación con la congelación	Puede haber pérdida de algunos nutrientes debido a la formación de cristales de hielo
Velocidad de conservación	Más lenta, adecuada para alimentos perecederos con una vida útil más corta	Más rápida, preserva la textura y sabor de los alimentos, mejor para almacenamiento a largo plazo
Efecto sobre la textura	Mantiene la textura original mejor que la congelación	Puede afectar la textura de ciertos alimentos, especialmente frutas y verduras frescas
Alimentos adecuados	Adecuada para productos lácteos, frutas, verduras y carnes con un período de almacenamiento corto	Ideal para carnes, pescados, pan, productos horneados y productos congelados que se almacenan por más tiempo
Inhibición del crecimiento bacteriano	Ralentiza el crecimiento bacteriano pero no lo detiene completamente	Detiene el crecimiento bacteriano y la actividad enzimática
Espacio de almacenamiento	Requiere menos espacio en comparación con la congelación	Requiere más espacio debido a la formación de hielo en los alimentos
Preparación y sabor	Preserva mejor el sabor original de los alimentos	Puede afectar la textura y sabor de algunos alimentos
Ciclo de descongelación	No se requiere descongelación antes de consumir	Puede requerir descongelación antes de cocinar o consumir, dependiendo del alimento

Fuente: elaboración propia, 2024.

En particular, el mayor factor que influencia la calidad de los alimentos cuando son congelados, se encuentra relacionado con la hidratación que poseen. Cuando la temperatura alcanza valores por debajo del punto de congelamiento es posible que se formen pequeñas estructuras (microscópicas) de hielo I hexagonal, la estructura de hielo más abundante en la naturaleza (Angulo, A., 2014; Coriell, L. et al., 1964). Debido a sus propiedades este arreglo cristalino posee una densidad menor a la del agua en estado líquido, lo que ocasiona que ocupe un volumen mayor, como consecuencia de la cristalización es posible que se generen diferentes condiciones adversas, como desbalance osmótico, deshidratación, ruptura de la membrana celular, desnaturalización de biomoléculas, entre otras (Angulo-Sherman, A., Mercado-Uribe, H., 2013; Salinas-Almaguer, S., et al., 2015; Angulo-Sherman, A., 2019).

Se ha observado que es posible regular el proceso de cristalización en diversas formas, por ejemplo: regulando la tasa de enfriamiento para promover los procesos rápidos, o la inclusión de sustancias que sirven como anticongelantes para inhibir el proceso de nucleación que forma cristales (Chavez-Quesada, J. y Acosta-Montoya, O., 2023; Dhanya, R. et al., 2023). Lo anterior ha llevado al desarrollo de diferentes tecnologías y procesos de congelación cuya aplicación depende en particular de las características del alimento y la tolerancia que muestra a las condiciones empleadas. La mayor parte de los procesos de congelamiento suceden en condiciones isobaras, esto es, a la presión del ambiente, sin embargo existe un procedimiento conocido como Congelamiento a alta presurización o HPF (High-Pressure Freezing), en el que alimentos líquidos son presurizados a cerca de 270 MPa y posteriormente son enfriados hasta alcanzar los -20°C . Una vez que han alcanzado esa temperatura se despresurizan de golpe y se genera un efecto de congelamiento instantáneo (Le Bail, A., et al., 2002; Sanz, P.D., y Otero, L., 2014; Angulo, A., 2014; Angulo-Sherman, A., 2019).

Fundamentos de la preservación isocórica

En la última década se han publicado diversos trabajos que han probado las condiciones isocóricas de almacenamiento en frío tratando de describir lo que sucede al interior de un contenedor isocórico y las condiciones que

inhiben y promueven el daño en tejido biológico por congelamiento (Rubinsky, B., et al., 2005; Wan, L., et al. 2019).

Un contenedor isocórico se propone como aquel que tiene la capacidad de impedir que la sustancia que se encuentra en su interior cambie su volumen, cuando existen cambios en otras variables termodinámicas como la presión o la temperatura. El agua posee una propiedad singular en comparación con otras sustancias cuando pasa de su estado líquido al sólido, mientras la mayor parte de las sustancias tienden a reducir el volumen que ocupan, el agua lo incrementa en su transición del estado líquido al hielo I hexagonal (hielo Ih), la estructura más abundante en la naturaleza; pudiendo incrementar su volumen hasta un 10 % del tamaño original (Angulo-Sherman, A. y Mercado-Uribe, H., 2013; Angulo-Sherman, A., 2019). Típicamente cuando el agua se congela en un contenedor cualquiera, como una tubería de agua, tiene la capacidad de vencer la resistencia mecánica del contenedor y lo rompe, esto se atribuye a la alta presión que se puede suscitar durante la solidificación (Angulo-Sherman, A., 2019).

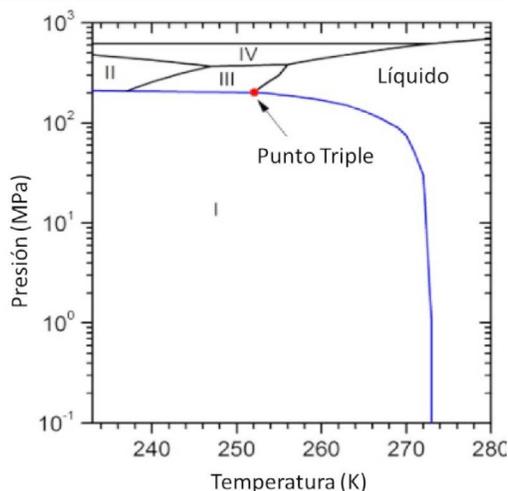
Un contenedor isocórico está diseñado de tal manera que sus paredes son lo suficientemente rígidas para tolerar la presión intrínseca que se genera en el agua y no ceder (romperse) cuando la misma debería iniciar el proceso de solidificación; esto inhibe el proceso de nucleación por lo que el agua permanece en estado líquido. Lo anterior puede explicarse a través del principio de L'Chatelier; que establece que cuando un sistema que se encuentra en equilibrio se ve perturbado por cualquier cambio aplicado a sus condiciones (concentración, presión, temperatura o volumen), entonces el sistema buscará restablecer el equilibrio contrarrestando la perturbación a través de las variables restantes (Preciado, J., 2007; Angulo-Sherman, A. y Mercado-Uribe, H., 2013, Angulo, A., 2014).

En el caso del agua en el contenedor isocórico, la concentración y el volumen son constantes, por lo que no pueden cambiar, por lo que al ir bajando la temperatura, la presión va incrementando de forma significativa. Teóricamente, la presión incrementa siguiendo la línea de transición de fase entre el estado líquido y el estado sólido (figura 1), hasta llegar al punto triple líquido-hielo Ih-hielo III, en el cual el agua es capaz de nuclear en ambos hielos, puesto que el hielo III ocupa un volumen menor, cediendo el espacio necesario para que la nucleación de hielo Ih pueda suceder (Angulo-Sherman, A. y Mercado-Uribe, H., 2013).

Es importante comprender que estos contenedores deben ser diseñados considerando las altas presiones que deben tolerar (<300 MPa), por lo que el diseño y los materiales elegidos para su construcción deben adecuarse a su propósito, algunos de los aceros de grado alimenticio podrían ajustarse a esta demanda.

Figura 1

Diagrama de fases del agua donde se destaca la línea de transición de fases entre el estado líquido y el hielo Ib (línea azul) y el punto triple del agua en estado líquido-hielo Ib-hielo III (punto rojo)

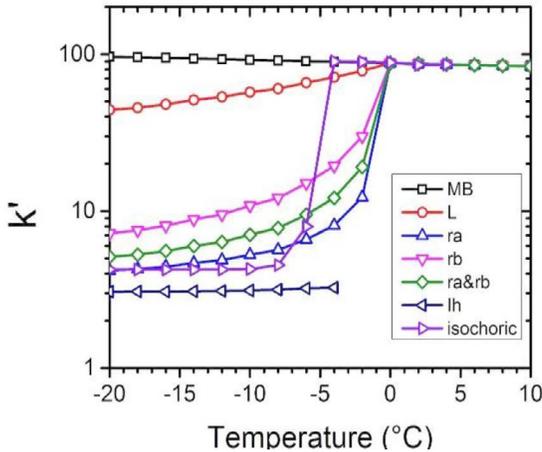


Fuente: Angulo-Sherman, A., 2019.

Sin embargo, como se aprecia en la figura 2, experimentalmente se ha observado que parece existir un proceso de nucleación no identificado a partir de los -6°C , que incrementa hasta alcanzar los -8°C , donde se vuelve estable para temperaturas inferiores (Angulo-Sherman, A., 2019). Dicho proceso, a pesar de haber sido detectado no ha sido identificado de forma inequívoca con alguna estructura conocida del hielo de acuerdo con el diagrama de fases de la sustancia.

Figura 2

Análisis a través de la constante dieléctrica del agua (k') para determinar la temperatura en que inicia el proceso de nucleación en un contenedor isocórico experimentalmente (línea morada), comparado con los valores para el estado líquido (línea negra) y el hielo ih (línea azul oscuro), así como varias propuestas teóricas de procesos de nucleación.



Fuente: Angulo-Sherman, A., 2019.

Estos contenedores entonces tienen la capacidad de permitir disminuir la temperatura a rangos equivalentes al congelamiento, permitiendo aprovechar sus ventajas de inhibición de los procesos metabólicos, pero evita el proceso de nucleación; el asociado a los efectos adversos del congelamiento en productos biológicos. Las condiciones anteriores pueden mantenerse en un rango de -6 a 0°C , y se han obtenido resultados para diferentes tipos de materiales de origen biológico, como tejidos, bacterias y alimentos (Wan, L., et al., 2018, Chavez-Quesada, J. y Acosta-Montoya, O., 2023; Dhanya, R. et al., 2023).

En particular, el caso de los alimentos ha tomado particular relevancia durante el año 2023, tratando de identificar diferentes alimentos que puedan ser sujetos a este tipo de preservación, pudiendo ofrecer mejores resultados de preservación si se les compara con otros procesos de congelamiento (Chavez-Quesada, J. y Acosta-Montoya, O., 2023; Dhanya, R. et al., 2023). Además entre las ventajas que se pueden obtener de este

proceso se encuentra que solo se requiere de agua como medio para preservación, sin algún tipo de sustancia que funcione como anticongelante; también, el rango de temperatura requerido es muy cercano al que pueden ofrecer unidades comerciales de enfriamiento como las que se utilizan en los congeladores que acompañan a un refrigerador (Powell-Palm, M. J. y Rubinsky, B., 2019; Chavez-Quesada, J. y Acosta-Montoya, O., 2023; Dhanya, R. et al., 2023).

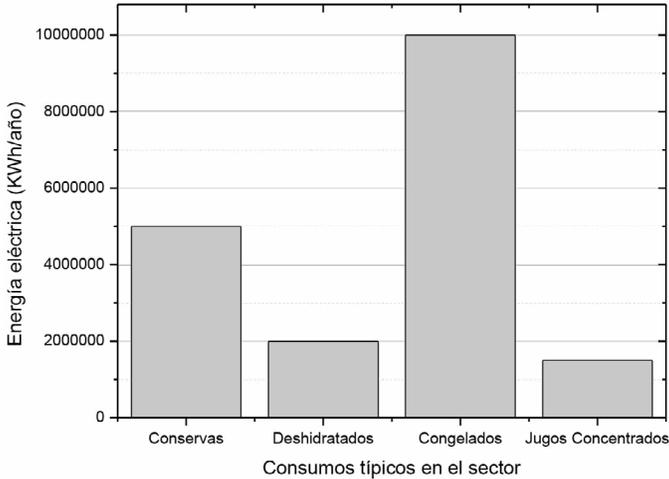
Demanda energética de un proceso de congelamiento

Los procesos de preservación a través del congelamiento pueden resultar costosos energéticamente (Energy, S., 2012; Powell-Palm, M. J. y Rubinsky, B., 2019; Chávez-Quesada, J. y Acosta-Montoya, O., 2023). El costo muchas veces estará relacionado con las características del alimento a preservar, el método de congelación y la temperatura del mismo, la duración del proceso, la eficiencia energética y de enfriamiento del equipo y el tiempo que requiere el proceso para llevarse a cabo.

El consumo que un proceso de congelamiento representa en comparación con el de otros procesos de la industria alimentaria es significativamente superior; por ejemplo, como se muestra en la gráfica de la figura 3 se presentan los resultados publicado en el Manual de eficiencia energética en la industria de alimentos elaborados, publicados en 2011; dónde la Agencia Chilena de Eficiencia Energética (AChEE) reportó los resultados de un estudio realizado a 20 plantas de alimentos durante los años 2010 y 2011, en los mismos se presenta una estimación del consumo energético de acuerdo con el proceso de preservación, el asociado al congelamiento es considerablemente alto comparado con los de otros procesos (Energy, S., 2012).

Figura 3

Gráfica que compara el consumo energético que representan diferentes procesos de preservación en la industria alimentaria



Fuente: Energy, S., 2012.

Se debe destacar que esta área se encuentra en continuo desarrollo para mejorar en términos de eficiencia energética; de tal forma que el sector alimentario procura la optimización de los procesos de congelación para minimizar el consumo energético. Lo anterior contribuye a la reducción del impacto ambiental y los costos asociados.

Es considerando lo anterior que la preservación isocórica se presenta como una alternativa para mejorar la eficiencia energética en la preservación por congelamiento, sin embargo, aún se requiere estudiar el proceso para poder conocer las condiciones específicas para su aplicación de manera industrial.

Metodología

Para evaluar las ventajas de la preservación isocórica en comparación con otros métodos utilizados en la cadena de frío para la preservación de alimentos, se llevó a cabo una búsqueda detallada de artículos de investigación relevantes. La búsqueda se centró en publicaciones desde el año 2019 hasta febrero de 2024, con el objetivo de obtener información pertinen-

te y actualizada a partir de la información devuelta por Google Scholar, Scopus, PubMed e Ingenta, a las palabras clave: preservación isocórica o isochoric preservation.

Debido a que la aplicación de esta tecnología no se limita a alimentos, se establecieron los siguientes criterios de inclusión y exclusión:

- a) Se incluyen las publicaciones entre el 2019 e inicios de 2024.
- b) Los artículos considerados deben enfocarse en experimentos con alimentos y patógenos relacionados con la seguridad alimentaria.
- c) Se excluyeron los trabajos enfocados en tejidos o cortes histológicos, o sobre viabilidad de gametos o cultivos; cualquier estudio no relacionado o que no brinde información relevante sobre alimentos.
- d) Se incluyen artículos publicados en español o inglés, excluyendo los trabajos en cualquier otro idioma.

De las publicaciones seleccionadas se recuperó información sobre el tipo de alimento o patógeno analizados. Se consideraron las condiciones de almacenamiento y su rango de temperatura; también, los efectos posteriores al almacenamiento reportados para las muestras, en particular los asociados a la calidad y seguridad alimentaria. La figura presenta de forma resumida la metodología propuesta para este trabajo.

Figura 4

Metodología para seleccionar y clasificar la información presentada en la sección de resultados



Fuente: elaboración propia, 2024.

Los resultados obtenidos en los estudios revisados se sintetizaron para presentar los hallazgos obtenidos hasta la fecha y facilitar que se visibilicen

las ventajas potenciales, así como desventajas, de la preservación isocórica, los hallazgos se desglosan en la siguiente sección.

Resultados obtenidos utilizando contenedores isocóricos

A pesar de que las condiciones isocóricas se han propuesto desde el año 2000, las mismas fueron probadas en una variedad limitada de modelos de estudios que abarcan cultivos biológicos, gametos, órganos (ratón) y algunos alimentos; hasta poco antes del 2020 (Chavez-Quesada, J. y Acosta-Montoya, O., 2023; Dhanya, R. et al., 2023). Dichos modelos pretendían probar la viabilidad de este proceso, sin embargo, resulta necesario realizar experimentos más específicos, que permitan determinar las condiciones apropiadas para casos y modelos más generales, de manera que pueda predecirse el efecto por ejemplo en diferentes alimentos dependiendo de sus características; es decir, no podemos esperar el mismo resultado para un trozo de sandía que para una hoja de espinaca, porque su hidratación, textura, etc. se pueden ver afectados de forma diferente por las condiciones de presurización previamente mencionadas.

Es por ello por lo que debe destacarse que el número de publicaciones sobre preservación isocórica orientada a diferentes alimentos aumentó después de 2020; en particular en el transcurso de los dos últimos años, tratando de validar el proceso de forma específica para diferentes tipos de alimentos (Chavez-Quesada, J. y Acosta-Montoya, O., 2023; Dhanya, R. et al., 2023). Estos estudios consideran de forma independiente diferentes propiedades; incluyendo algunas organolépticas, como la deshidratación, firmeza, textura, coloración, aroma, entre otras. También es importante destacar que en algunos casos en lugar de agua se utilizan soluciones isotónicas, con la intención de poder regular de forma más específica el proceso de nucleación.

Entre los resultados que se han obtenido para diferentes muestras se encuentran la tabla 2:

Tabla 2

Resumen de resultados obtenidos durante la preservación isocórica de los diferentes alimentos

Objetos de estudio	Condiciones de almacenamiento isocórico	Aspectos relevantes.
Papa	-3 a -5 °C 1 – 7 días	La pérdida de masa, cambio de coloración y textura son mínimas.
Tomate	-2.5 °C 1 – 7 días	La pérdida de masa es menor comparada con otras congelaciones, presenta un ligero cambio de coloración. Preserva sus propiedades nutrimentales como los carotenoides.
Espinaca	-3 a -5 °C 1 – 7 días	El cambio de masa es menor comparada con otros procesos, presenta cambio en su coloración y textura, aunque existe evidencia de que se previene el daño celular. Logra conservar parte de sus propiedades nutrimentales.
Cereza	-4 a -7 °C 1 – 7 días	Su cambio de masa es pequeño, en apariencia no hay cambios significativos en su coloración. Logra preservar su valor nutrimental.
Granada	-2.5 °C	Logra preservar su textura. Reduce la carga microbiana.
Carne	-4 a -8°C	Conserva sus propiedades de calidad.
Pescado	-5 °C	Conserva su textura. Reduce la carga microbiana.

Fuente: Chavez-Quesada, J. y Acosta-Montoya, O., 2023; Dhanya, R. et al., 2023.

Entre estos resultados es importante destacar que las temperaturas a las que se someten las muestras, si bien se encuentran debajo del punto de fusión, el rango de temperaturas es específico para la muestra y se encuentra por encima del rango de temperaturas en los que operan las unidades domésticas, más aún si se les compara con las unidades comerciales o industriales. Además, en algunos de los casos los resultados pueden percibirse de forma directa como se aprecia en la figura 5, donde la apariencia del producto preservado isocóricamente corresponde mejor a la de un producto fresco en comparación con los sometidos a otros procesos.

Figura 5

Resultados de investigaciones realizadas con tomates y espinacas, donde se aprecia como las muestras conservadas isocóricamente se asemejan más a las frescas



Fuente: Bilbao-Sainz, C., et al., 2020, 2021.

Además, existen trabajos donde se ha experimentado el efecto de estas condiciones en algunos ejemplos de patógenos que ocasionalmente acompañan a los alimentos (Chavez-Quesada, J. y Acosta-Montoya, O., 2023; Dhanya, R. et al., 2023), probando que en algunos casos como el de *Escherichia coli*, es posible inactivar a las bacterias, como se muestra en la Tabla 3 y que coinciden con investigaciones previas (Salinas-Almaguer, S., et al., 2015; Powell-Palm, M.J., et al., 2018). Lo anterior puede ser atractivo porque en conjunto con la preservación, podría ser posible la inactivación de diferentes bacterias en el proceso, sin embargo se requiere extender el número de estudios y condiciones de almacenamiento para identificar de

forma específica aquellas que podrían aplicarse para obtener mejores condiciones de seguridad alimentaria.

Tabla 3

Resultados obtenidos aplicando almacenamiento isocórico en patógenos biológicos

Objetos de estudio	Condiciones de almacenamiento isocórico	Aspectos relevantes
Escherichia coli	-15°C a -20°C 1 día	Cultivos no viables en condiciones de preservación entre -15 a -20°C. Eliminación de bacterias en un rango entre -15 y -16°C.
Salmonella Typhimurium	-15 °C 1 día	Son capaces de sobrevivir a las condiciones de almacenamiento isocórico.
Listeria monocytogenes	-15 °C 1 día	Son capaces de sobrevivir a las condiciones de almacenamiento isocórico.

Fuente: Chavez-Quesada, J. y Acosta-Montoya, O., 2023; Dhanya, R. et al., 2023.

Conclusiones

La preservación isocórica es una técnica novedosa entre aquellas que se utilizan para la preservación de alimentos en temperaturas de congelamiento. Entre las ventajas que se vislumbran se encuentran la preservación de productos con mayor calidad e inocuidad y el incremento en eficiencia energética, lo que reduce el consumo energético y podría en algunos casos traducirse a un ahorro económico. Todo lo anterior gira en torno al conocimiento del comportamiento anómalo del agua, de tal manera que una investigación más detallada sobre estos temas permitiría la mejor comprensión de lo que sucede al interior de un contenedor isocórico, así como la identificación de rangos de temperatura prometedores que permitan lograr la mejor preservación posible de acuerdo con las características de los alimentos, el tipo de materiales recomendables para la construcción de

los contenedores y diseños que permitan su operación continua tolerando las condiciones de alta presión en su interior.

Los contenedores isocóricos ejemplifican como el conocimiento sobre ciencia del agua, permite proponer estrategias que impactan sobre la mejora en la preservación de alimentos, pudiendo reducir el costo energético; contribuyendo dentro del trinomio agua-energía-alimentos. Además, a través de ellos es posible plantear nuevas estrategias que reduzcan el consumo energético en la industria alimentaria, pudiendo potencialmente impactar en los ODS.

Referencias bibliográficas

- Angulo, A. (2014). Transporte iónico y relajación dieléctrica de agua y mezclas de agua y glicerol en condiciones isocóricas. (Publicación No. 3248) [Disertación de tesis Doctoral, Centro de Investigación y Estudios Avanzados del I. P. N., Monterrey]. Repositorio CINVESTAV. <https://repositorio.cinvestav.mx/handle/cinvestav/3248>
- Angulo-Sherman, A. (2019). Isochoric Containers and Its Frontier Between Cryopreservation and Sterilization. *Cryoletters*, 40(1), 51-57. https://scholar.google.com.mx/citations?view_op=view_citation&hl=en&user=Fe_Nm8gAAAAJ&citation_for_view=Fe_Nm8gAAAAJ:qjMakFHDy7sC
- Angulo-Sherman, A., & Mercado-Uribe, H. (2014). Water under inner pressure: A dielectric spectroscopy study. *Physical Review E*, 89(2), 022406. https://www.researchgate.net/profile/H-Mercado-Uribe/publication/262982506_Water_under_inner_pressure_A_dielectric_spectroscopy_study/links/55880c8008ae65ae5a4def6a/Water-under-inner-pressure-A-dielectric-spectroscopy-study.pdf
- Bilbao-Sainz, C., Sinrod, A. G., Dao, L., Takeoka, G., Williams, T., Wood, D., & McHugh, T. (2020). Preservation of spinach by isochoric (constant volume) freezing. *International Journal of Food Science & Technology*, 55(5), 2141-2151. https://www.researchgate.net/publication/337610137_Preservation_of_spinach_by_isochoric_constant_volume_freezing

- Bilbao-Sainz, C., Sinrod, A. J. G., Dao, L., Takeoka, G., Williams, T., Wood, D., Chiou, B.S., Bridges, D. F., Wu, V. C. H., Lyu, C., Powell-Palm, M. J., Rubisnky, B., & McHugh, T. (2021). Preservation of grape tomato by isochoric freezing. *Food Research International*, 143, 110-228. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2021.110228>
- Chaves-Quesada, J., & Acosta-Montoya, O. (2023). Congelación isocórica: ventajas y oportunidades de investigación en la industria de alimentos. *Agronomía Mesoamericana*, 52879-52879. <https://revistas.ucr.ac.cr/index.php/agromeso/article/download/52879/56123/243899>
- Coriell, L. L., Greene, A. E., & Silver, R. K. (1964). Historical development of cell and tissue culture freezing. *Cryobiology*, 1(1), 72-79. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/0011224064900240>
- Dhanya, R., Panoth, A., & Venkatachalapathy, N. (2023). *Comprehensive Review on Isochoric Freezing: A Recent Technology for Preservation of Food and Non-food Items*. *Sustainable Food Technology*. <https://pubs.rsc.org/en/content/articlelanding/2024/fb/d3fb00146f>
- Energy, S. (2012). *Manual eficiencia energética en la industria de alimentos elaborados. Chile alimentos y ACHEE*. Disponible en [acceso 20/03/2016]: http://www.chilealimentos.com/medios/LaAsociacion/NoticiasChilealimentos2012/MANUAL_DE_Eficiencia_Energetica_Chilealimentos.pdf.
- FAO. (2012). *Loss and waste of food in the world - Scope, causes and prevention*. Publication Division FAO, Rome, Italy. <http://www.fao.org/3/a-i2697s.pdf>
- LeBail, A., Chevalier, D., Mussa, D. M., & Ghoul, M. (2002). High pressure freezing and thawing of foods: a review. *International Journal of Refrigeration*, 25(5), 504-513. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0140700701000305>
- Naciones Unidas. (2015-a). *Objetivos y metas de desarrollo sostenible. Naciones Unidas*. <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/objetivos-de-desarrollo-sostenible/>
- Naciones Unidas. (2015-b). *Objetivos y metas de desarrollo sostenible. Naciones Unidas*. <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/hunger/>

- Powell-Palm, M. J., & Rubinsky, B. (2019). A shift from the isobaric to the isochoric thermodynamic state can reduce energy consumption and augment temperature stability in frozen food storage. *Journal of Food Engineering*, 251, 1–10. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2019.02.001>
- Powell-Palm, M. J., Preciado, J., Lyu, C., & Rubinsky, B. (2018). Escherichia coli viability in a isochoric system at subfreezing temperatures. *Cryobiology*, 85, 17–24. <https://doi.org/10.1016/j.cryobiol.2018.10.262>
- Preciado, J. (2007). *The Fundamentals of Isochoric Freezing and its Role in the Cryopreservation of Biological Materials* (Publication No. 3306298) [Doctoral dissertation, University of California, Berkeley]. ProQuest Dissertations and Theses Global. <https://www.proquest.com/docview/304902637?pq-origsite=gscholar&fromopenview=true>
- Rios, M., & Kaltschmitt, M. (2013). Bioenergy potential in Mexico—status and perspectives on a high spatial distribution. *Biomass Conversion and Biorefinery*, 3, 239–254. https://www.researchgate.net/publication/257804054_Bioenergy_potential_in_Mexico_-_Status_and_perspectives_on_a_high_spatial_distribution
- Rubinsky, B., Pérez, P. A., & Carlson, M. E. (2005). The thermodynamic principles of isochoric freezing cryopreservation. *Cryobiology*, 50(2), 121–138. <https://doi.org/10.1016/j.cryobiol.2004.12.002>
- Salinas-Almaguer, S., Angulo-Sherman, A., Sierra-Valdez, F. J., & Mercado-Uribe, H. (2015). Sterilization by cooling in isochoric conditions: the case of Escherichia coli. *Plos one*, 10(10), e0140882. <https://journals.plos.org/plosone/article?id=10.1371/journal.pone.0140882>
- Sanz, P. D., & Otero, L. (2014). High-pressure freezing. In D. W. Sun (Ed.), *Emerging technologies for food processing* (pp. 515–538). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-411479-1.00028-0>
- Wan, L., Powell-Palm, M. J., Lee, C., Gupta, A., Weegman, B. P., Clemens, M. G., & Rubinsky, B. (2018). Preservation of rat hearts in subfreezing temperature isochoric conditions to – 8 °C and 78 MPa. *Biochemical and Biophysical Research Communications*, 496(3), 852–857. <https://doi.org/10.1016/j.bbrc.2018.01.140>

Capítulo 2.2

Estrategias corporativas para la reducción de gases de efecto invernadero: sostenibilidad y calidad del aire

Aída Lucía Fajardo Montiel¹
Hermes Ulises Ramírez Sánchez²
Héctor Hugo Ulloa Godínez³
Mario Enrique García Guadalupe⁴
Jaime Alcalá Gutiérrez⁵
Rubén Sánchez Gómez⁶

<https://doi.org/10.61728/AE24004299>



¹ Profesora investigadora del Departamento de Estudios del Agua y la Energía del Centro Universitario de Tonalá de la Universidad de Guadalajara. *e-mail:* lucia.fajardo@academicos.udg.mx

² Profesor investigador de la Universidad de Guadalajara. *e-mail:* hermes.ramirez@academicos.udg.mx

³ Profesor investigador de la Universidad de Guadalajara. *e-mail:* hector.ulloa@academicos.udg.mx

⁴ Profesor investigador de la Universidad de Guadalajara. *e-mail:* mario.gguadalupe@academicos.udg.mx

⁵ Profesor investigador de la Universidad de Guadalajara. *e-mail:* jaime.alcala@academicos.udg.mx

⁶ Profesor investigador de la Universidad de Guadalajara. *e-mail:* ruben.sgomez@academicos.udg.mx

Introducción

La fuerte carga de contaminación ambiental del aire se ha convertido en un elemento de atención alarmante para la comunidad científica y académica, así mismo para diversas organizaciones a nivel global. Esto debido a que la dicha contaminación y sus repercusiones tanto en flora y fauna tienen un nocivo impacto sobre la salud ambiental. Los avances en la investigación científica han permitido un notorio avance en la identificación de contaminantes específicos, así mismo y dependiendo de sus concentraciones y tiempos de exposición, tienen una influencia directa en la aparición de enfermedades en grupos poblacionales vulnerables como, niños, adultos mayores y personas con enfermedades cardiovasculares o respiratorias (Fajardo y Ramírez, 2023). Información publicada por la Organización Mundial de la Salud (OMS, 2022), indican que aproximadamente el 99 % de la población mundial, se encuentra expuesta a un aire que rebasa los límites de calidad recomendados a nivel internacional.

La degradación de la calidad del aire se debe a múltiples factores que ocasionan la presencia de diversas partículas, entre ellas destacan el dióxido de azufre (SO₂), dióxido de nitrógeno (NO_x), compuestos orgánicos volátiles (COV), monóxido de carbono (CO), material particulado (PM) y Ozono (O₃). Para ampliar la comprensión sobre el problema, el primer paso es el conocimiento sobre los parámetros en la calidad de aire. Los tomadores de decisiones como gobiernos y comunidad científica necesitan contar con información sobre la calidad del aire. Para generar los datos se requiere la combinación de los resultados de los monitoreos constantes de la calidad del aire, información sobre modelos predictivos y no menos importante los inventarios de emisiones (Instituto Nacional de Ecología, s/f).

Fuentes de contaminación del aire

Desde 1750, se han identificado múltiples factores como el cambio en el uso de suelo y el aumento en la quema de combustibles fósiles, los cuales han provocado un aumento del dióxido de carbono atmosférico de aproximadamente 46 % provocando un calentamiento global con importantes consecuencias sociales (Heiskanen et al., 2022).

Hoy en día, tenemos los más altos niveles de concentración de emisiones de Gases de Efecto Invernadero de los últimos 2 mil millones de años. Las últimas cuatro décadas han sido las más cálidas desde 1850. Los pronósticos científicos estiman que si las temperaturas globales aumentan por arriba de los 2°C, se producirán cambios irreversibles en el clima, lo cual se volverá gradualmente inhabitable para la raza humana (Gramc et al., 2022). Datos no muy alentadores presentados por Ramírez et al., (2022), en su artículo “The Agricultural Sector and Climate Change in Mexico”, indican que en el verano de 1998 a 2002, persistieron temperaturas elevadas anómalas en el norte de México, alrededor de +2°C, con precipitaciones inferiores a lo normal -20 y -30 %, lo cual provocó una sequía prolongada con fuertes impactos sobre la agricultura de la región y un incremento en los incendios forestales.

Según los expertos, limitar el aumento de 2°C de la temperatura media global, requiere la reducción de los niveles de dióxido de carbono en un 85 % por debajo de los niveles registrados en el año 2000, el objetivo es que esta reducción se materialice antes del año 2050. La contaminación del aire ocurre por diversas fuentes, por un lado, tenemos la contaminación natural del aire la cual ocurre por acción del viento, erupciones volcánicas, polen, entre otras. Las acciones antropogénicas son otra fuente de contaminación; a medida que las civilizaciones crecen, la contaminación forma a ser parte de ellas. A lo largo de la historia, la expansión de la población conduce a la deforestación, el incremento de fuentes de trabajo, uso de combustibles, y demás factores que fungen como precursores de la contaminación del aire.

Es por lo anterior que la comprensión de las fuentes contaminantes es de vital importancia por un lado para la comprensión, pero por el otro para la elaboración es estrategias de mitigación, control y eliminación. Se-

gún datos de SEMARNAT, es posible agrupar las fuentes de contaminación atmosférica en las siguientes categorías:

- a) Fuentes de contaminación puntual, como hornos industriales, torres de enfriamiento, plantas siderúrgicas, refinerías de petróleo, plantas de energía eléctrica.
- b) Fuentes móviles provenientes de automóviles particulares, autobuses de transporte público, aviones públicos y privados, barcos y embarcaciones, maquinaria de construcción.
- c) Fuentes de área como son, solventes domésticos, quema de residuos agrícolas, tintorerías y lavanderías, panaderías industriales, crematorios.
- d) Y las fuentes naturales o biogénicas como las erupciones volcánicas, polen y esporas de plantas, gases de océanos, incendios forestales.

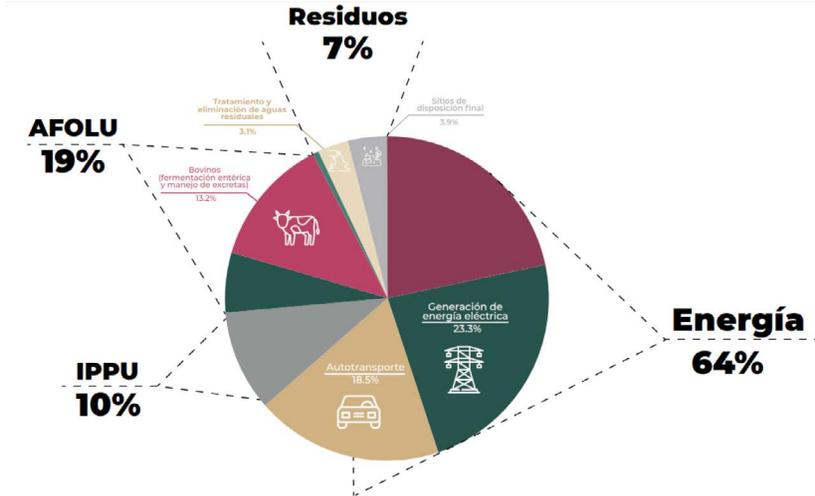
Es importante resaltar que el origen del contaminante se distingue en dos categorías:

- i) Los contaminantes primarios: los cuales se emiten de manera directa de fuentes de contaminación como monóxido de carbono, metano, mercurio, amoníaco entre otros.
- ii) Los contaminantes secundarios, los cuales no se emiten de manera directa, sino que forman parte del resultado de las interacciones de dos o más contaminantes primarios presentes en la atmósfera (SEMARNAT, 2018).

En el contexto nacional, durante 2019 el INEGYCEI (Inventario Nacional de Emisiones de Gases y Compuestos de Efecto Invernadero) registró que México emitió 736.63 millones de toneladas de dióxido de carbono, considerado este como el principal gas de efecto invernadero con un 67 %, el resto de los gases el metano y óxido nitroso considerados dentro de la misma categoría de presentan en la siguiente figura (Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático, 2019) (Figura 1)

Figura 1

Inventario nacional de emisiones de gases y compuestos de efecto invernadero



Fuente: INEGYCEI, 1990 – 2019.

Es importante destacar que el cambio climático comenzó a ganar relevancia con el reconocimiento de la relación entre las emisiones de gases de efecto invernadero principalmente el dióxido de carbono (CO₂) y el calentamiento global. Por lo que el monitoreo y cuantificación de las emisiones se ha vuelto tan relevante. Lo que ha llevado a la elaboración de herramientas para este fin (Cardoza et al., 2023).

Como anteriormente se ha mencionado, cuantificar y monitorear el impacto de la contaminación atmosférica es básico para guiar las decisiones y estrategias de los formuladores de políticas sobre la reducción de emisiones (Heiskanen et al., 2022).

El protocolo de gases de efecto invernadero

La coalición de más de 170 empresas internacionales, convocada por el Instituto de Recursos Mundiales (WRI) y por el Consejo Mundial Empresarial para el Desarrollo Sustentable (WBCSD) en 1998, logró el resultado de dos estándares que guardan una estrecha colaboración:

- a) Estándar Corporativo de Contabilidad y Reporte del Protocolo de GEI (Gases de Efecto Invernadero).
- b) Estándar de Cuantificación de Proyectos del Protocolo de GEI.

En este documento nos atañe abordar el Estándar Corporativo de Contabilidad y Reporte del Protocolo de GEI, el cual vio la luz por primera vez en septiembre de 2001, siendo ampliamente aceptado en el mundo empresarial, e incluso muchas empresas, ONG y gobiernos han utilizado esta herramienta como un estándar para elaborar sus sistemas de contabilidad y reporte. Considerando que el cambio climático y el calentamiento global son temas clave, las empresas deben ser capaces de comprender, adaptarse y gestionar los riesgos asociados a los GEI. Es importante destacar que un inventario consistente y bien diseñado puede contribuir de manera efectiva en la consecución de objetivos empresariales como:

- 1) Gestión de Riesgos.
- 2) Reportes Públicos.
- 3) Participación en programas.
- 4) Ampliación de mercados.
- 5) Reconocimiento de acciones tempranas de reducción de emisiones (WRI, 2004).

El protocolo de GEI, es considerado como una de las herramientas con mayor estructura durante la última década. Recientemente el Parlamento Europeo, aprobó una nueva directiva de informes de sustentabilidad, y estos estándares deberán aplicarse bajo la directiva que marca el protocolo GEI en término de informe de emisiones (Kasperzak et al., 2023). La metodología del protocolo GEI se utiliza y reconoce en todo el mundo y se aplicó como base de la norma ISO 14064 (Gramc et al., 2022).

Para lograr que la información reportada sea verdadera y confiable, es indispensable apegarse a cinco principios fundamentales que derivan de los reportes financieros y contables, los cuales son: Relevancia, integridad, consistencia, transparencia y precisión (WRI, 2004). Diversas partes interesadas contemplan de manera expectativa la respuesta que las empresas gestionen de manera proactiva los desafíos del cambio climático, con la intención que tomen acciones responsables en torno a sus prácticas ambientales.

Sin embargo, la adopción voluntaria de los sectores industriales a nivel global no es una certeza, existen barreras que se interponen como la falta de estrategias y comportamientos ambientales responsables. Aunado a esto la falta de regulaciones obligatorias por parte de los países a excepción de unos pocos, nos indica que la cooperación para la mitigación sigue siendo un reto importante ante la adopción de medidas completamente efectivas ante la creciente preocupación relacionada con el cambio climático. En términos duros, la relación entre las regulaciones ambientales, las estrategias ambientales adoptadas por las organizaciones y el desempeño de los sistemas corporativos ambientalmente responsables se exploran escasamente.

En el contexto local de México, se instauró el “Programa GEI México”, una iniciativa privada destinada a establecer un esquema voluntario de reporte de emisiones. Este programa surge gracias a la colaboración entre la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT), el Consejo Mundial Empresarial para el Desarrollo Sostenible y el Instituto de Recursos Mundiales. Es importante señalar que México fue el primer país en vías de desarrollo en adoptar este protocolo, no con obligaciones cuantitativas de mitigación, sino con el compromiso de informar periódicamente sobre el estado de sus emisiones (Jiménez, 2010).

Para el año 2009, 98 empresas, tanto del sector privado como público en México, se habían inscrito en el programa. Entre ellas se encontraban PEMEX, así como todas las empresas del sector cementero y cervecero, y varias del sector minero, siderúrgico, químico y de bebidas embotelladas (Jiménez, 2010). De acuerdo con el documento “Contribución Determinada a Nivel Nacional”, en su actualización del año 2022. México ha aumentado en 13 % sus objetivos de mitigación, apuntando a una reducción del 35 % de los GEI para el año 2030. Datos comprometidos en el año 2020 indicaban una reducción de 22 % (PNUD, 2024).

En el ámbito local, México ha jugado un papel pionero en la lucha contra el cambio climático mediante la implementación del “Programa GEI México”. Este programa, establecido como una iniciativa privada, tiene el objetivo de fomentar la transparencia en el reporte de emisiones al adoptar un esquema voluntario. Las ventajas ambientales relacionados con el protocolo son los beneficios de mitigación de GEI de las estrategias y medidas integradas de reducción de la contaminación del aire. Al mismo

tiempo, el consumo de energía se reducirá en el proceso de mitigación de GEI debido a la relación altamente positiva entre la mitigación de GEI y el ahorro de energía. Los beneficios ambientales derivados de la implementación de las herramientas del Protocolo de GEI abarcan la prevención de la contaminación, la reducción de la huella ecológica y el fomento del desarrollo de competencias orientadas al respeto del medioambiente. (Ning et al., 2023).

Aunado a los beneficios ambientales, Khuntia et al. (2018), demuestra de forma empírica que el desempeño ambiental y económico en las organizaciones están relacionados positivamente; esto a pesar de que las empresas perciben la sostenibilidad como un pasivo. Es evidente que los beneficios ecológicos percibidos pueden motivar numerosas estrategias ambientales. Algunos investigadores han informado que el incentivo general para las empresas es lo que tiene sentido comercial para aplicar estrategias sostenibles (Ning et al., 2023). Cuando las organizaciones cumplen con las expectativas de las partes interesadas, especialmente en términos de reducción de gases de efecto invernadero, los resultados obtenidos pueden influir positivamente en su desempeño operativo y financiero. Estos beneficios se manifiestan en forma de ganancias intangibles, acceso preferencial a fuentes de capital y ventajas competitivas sostenibles (Roberto et al., 2018).

Ahora bien, cuando las organizaciones realizan el inventario de emisiones GEI, este indicador ayuda en la organización de mejoras relacionadas con procesos productivos, cadena de suministro, selección de nuevas fuentes energéticas y de manera general en la optimización de sus procesos (Roberto et al., 2018).

Límites operacionales del protocolo de gases de efecto invernadero

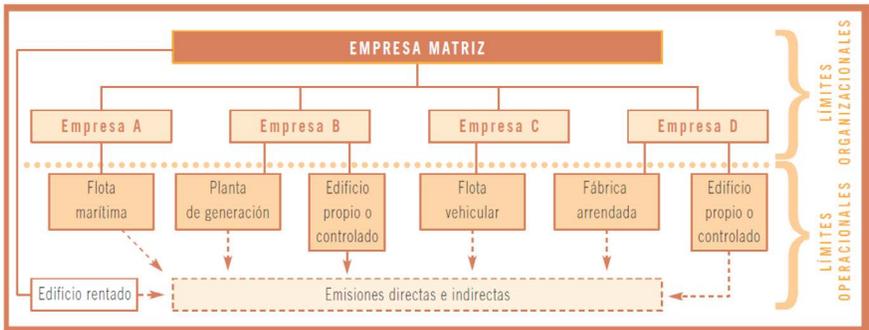
La identificación y establecimiento de límites operacionales es un factor fundamental para realizar la correcta integración del inventario GEI, esto involucra la identificación de emisiones directas e indirectas (WRI, 2004). Las emisiones directas provienen de fuentes que son propiedad de la organización o están bajo su control. En contraste, las emisiones indirectas

son aquellas que, aunque resultan de las actividades de la empresa, ocurren bajo el control de otras entidades.

La figura 2: ejemplifica de manera más puntual las emisiones directas o indirectas de una organización:

Figura 2

Protocolo de gases de efecto invernadero. Determinación de los límites operacionales

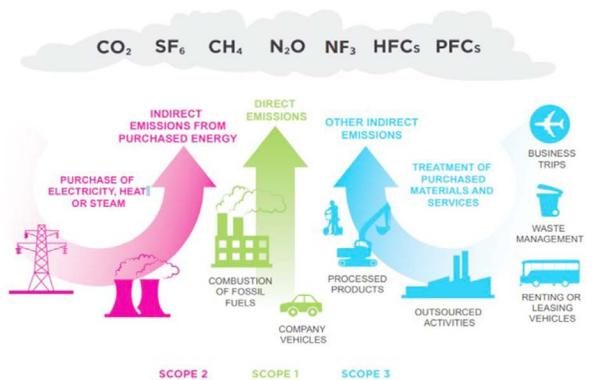


Fuente: WRI, 2004.

Siguiendo esta línea, la delimitación de las fuentes directas e indirectas, el Protocolo GEI, define tres alcances, los cuales denominaremos de ahora en adelante como *Scope 1*, *Scope 2* y *Scope 3*, los cuáles ayudan con la transparencia de la información y así promover la utilidad de los inventarios.

- a) *Scope 1*: Este alcance abarca las emisiones que provienen de fuentes que son propiedad de la empresa o están bajo su control directo, como calderas, maquinaria y vehículos.
- b) *Scope 2*: En este alcance se incluyen las emisiones generadas por la electricidad que la empresa adquiere y consume. Aunque la empresa utiliza esta electricidad, las emisiones se producen en la planta donde se genera la energía.
- c) *Scope 3*: Este alcance, de carácter opcional en los reportes, permite incluir el resto de las emisiones indirectas. Estas emisiones son consecuencia de las actividades de la empresa, pero provienen de fuentes que no son de su propiedad ni están bajo su control. Ejemplos incluyen la extracción y producción de materiales adquiridos, así como el uso de productos y servicios (Figura 3).

Figura 3
 Scope 1, 2 y 3



Fuente: WRI, 2004.

Para muchas organizaciones los *Scope 1* y *2* representan las mayores fuentes de emisión de los GEI. Sin embargo, al unir la contabilidad de las emisiones directas e indirectas, múltiples empresas pueden trabajar en conjunto para la reducción de las emisiones. Es importante considerar que el *Scope 1*, resulta ser ya sea el *Scope 2* y *3* de otras organizaciones. Esto permite que múltiples entidades mantengan un inventario a lo largo de toda la cadena de valor.

Scope 1

En el **Scope 1**, las empresas agrupan las emisiones directas que resultan de los siguientes tipos de actividades:

- 1.1) Generación de electricidad, calor y vapor: Estas emisiones se producen por la quema de combustibles fósiles para generar energía térmica y eléctrica.
- 1.2) Procesos fisicoquímicos: Asociadas principalmente con la manufactura de productos químicos y materiales como cemento, aluminio y el procesamiento de residuos, estas emisiones resultan de reacciones químicas y transformaciones físicas durante la producción.
- 1.3) Transporte de materiales, productos, residuos y trabajadores: Este tipo de emisiones proviene del uso de medios de transporte como trenes, autobuses y vehículos que son propiedad de la empresa o están bajo su

control.

1.4) Emisiones fugitivas: Este término abarca las emisiones resultantes de liberaciones intencionales o no intencionales, como fugas en equipos, emisiones de gases durante el uso de sistemas de aire acondicionado y refrigeración, entre otros.

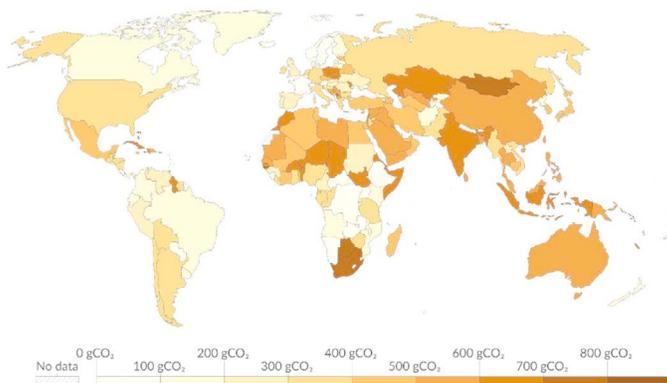
En el ámbito del **Scope 2**, se contabilizan las emisiones generadas por el uso de electricidad comprada para las actividades y equipos que son propiedad de la empresa o que están bajo su supervisión. Es fundamental destacar que, para numerosas organizaciones, la electricidad adquirida constituye una de las principales fuentes de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI).

Cada año, la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT) publica un aviso conocido como el Factor de Emisión del Sistema Eléctrico Nacional. Este documento, elaborado con datos proporcionados por la Comisión Reguladora de Energía, establece el valor que se debe utilizar para calcular las emisiones indirectas de gases de efecto invernadero (GEI) derivadas del consumo de electricidad. Para 2023, el documento indica un factor de 0.438 toneladas de dióxido de carbono equivalente (tCO₂e) por megavatio-hora (MWh) consumido (SEMARNAT, 2024). El cálculo de este factor se basa en dos metodologías: a) AP-42 de la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (US-EPA) en su quinta edición, y b) el Panel Intergubernamental de Cambio Climático (IPCC). Este reporte se fundamenta en la fracción XLIV del Artículo 3 de la Ley de la Industria Eléctrica. La información proporcionada es crucial para que las organizaciones calculen sus emisiones indirectas asociadas al consumo de electricidad y puedan incluir estos datos en el *Scope 2*.

Ahora bien, la guía disponible para el *Scope 2*, no solamente identifica la adquisición de energía eléctrica, sino también aquellas emisiones indirectas derivadas de la compra de vapor, calor, enfriamiento y, esta guía goza de un apartado para realizar aclaraciones sobre su contabilidad.

La figura 4 nos muestra un panorama global sobre la intensidad en la generación de GEI debido a la generación de energía eléctrica, la intensidad del carbono se mide en gramos equivalentes de dióxido de carbono emitidos por kilovatio-hora de electricidad generada.

Figura 4
Panorama global de GEI



Fuente: Ember - Yearly Electricity Data (2023); Ember - European Electricity Review (2022); Energy Institute - Statistical Review of World Energy (2023).

El Estándar del **Scope 3**, es un suplemento del protocolo de gases de efecto invernadero. El Scope tres, recaba datos sobre las emisiones más difíciles de controlar, debido a que son aquellas que están fuera del control directo. Esto no significa que no se logre tener cierto grado de influencia sobre ellas. Un ejemplo de ello es que las organizaciones pueden decidir a que proveedores contratar en función de sus prácticas (WEF, 2022).

Las emisiones relacionadas con el *Scope 3* pueden, en algunos casos, representar la mayor fuente de emisiones para ciertas empresas, ofreciendo al mismo tiempo las oportunidades más significativas para su reducción. Al elaborar un inventario de Scope 3, las organizaciones pueden comprender mejor la generación de emisiones tanto internas como externas. Esto les permite obtener información valiosa sobre los riesgos y oportunidades asociados con sus emisiones y su cadena de valor (WRI, 2011).

Para algunas empresas, realizar la contabilización del scope 3, es una forma de alentar la responsabilidad de medir y contabilizar las emisiones de sus proveedores. Las emisiones del scope 3 se clasifican en 15 categorías distintas, a través de estas categorías las empresas gozan de un marco sistemático para organizar, comprender e informar sobre la diversidad de actividades dentro de la cadena de valor corporativo. Estas categorías están diseñadas para ser mutuamente excluyentes, la intención es evitar conteos duplicados:

- 1) Compra de bienes y servicios: Incluye la extracción, producción y transporte de bienes y servicios que la empresa adquiere o compra.
- 2) Bienes de capital: Comprende la extracción, producción y transporte de bienes de capital adquiridos por la empresa.
- 3) Actividades relacionadas con combustibles y energía (no incluidas en *Scope 1* o *Scope 2*): Se refiere a la extracción, producción y transporte de combustibles y energía comprados por la empresa durante el período de informe.
- 4) Transporte y distribución *upstream*: Abarca el transporte y la distribución de productos adquiridos por la empresa en vehículos e instalaciones que no son propiedad ni están bajo su control. Incluye servicios de transporte y distribución comprados, como la logística de entrada, la logística de salida (por ejemplo, productos vendidos) y el transporte entre las propias instalaciones de la empresa.
- 5) Residuos generados en las operaciones: Engloba la disposición y tratamiento de los residuos generados por las operaciones de la empresa en instalaciones que no son propiedad ni están bajo su control.
- 6) Viajes de negocios: Incluye el transporte de empleados para actividades relacionadas con el negocio en vehículos que no son propiedad de la empresa ni están operados por ella.
- 7) Desplazamientos de empleados: Comprende el transporte de empleados entre sus hogares y lugares de trabajo en vehículos que no pertenecen ni son operados por la empresa.
- 8) Activos arrendados *upstream*: Refleja la operación de activos arrendados por la empresa que informa (arrendatario) que no están incluidos en *Scope 1* y *Scope 2*.
Transporte y distribución *downstream*: Incluye el transporte y la distribución de productos vendidos por la empresa desde sus operaciones hasta el consumidor final, incluyendo el comercio minorista y el almacenamiento, utilizando vehículos e instalaciones que no son de propiedad ni están controladas por la empresa.
- 9) Procesamiento de productos vendidos: Se refiere al procesamiento de productos intermedios vendidos durante el año del informe por empresas transformadoras, como fabricantes.
- 10) Uso de productos vendidos: Comprende el uso final de los bienes y servicios vendidos por la empresa durante el año del informe.
- 11) Tratamiento al final de su vida útil de los productos vendidos: Abarca la eliminación y tratamiento de los productos vendidos por la empresa al final de su vida útil durante el año del informe.
- 12) Activos arrendados *downstream*: Se refiere a la operación de activos propiedad de la empresa que informa (arrendador) y arrendados a otras entidades durante el año del informe, no incluidos en *Scope 1* y *Scope 2*.

13) Franquicias: Incluye la operación de franquicias durante el año del informe, que no están incluidas en *Scope 1* y *Scope 2*, reportado por el franquiciador.

14) Inversiones: Abarca la operación de inversiones, incluyendo inversiones de capital, deuda y financiación de proyectos, durante el año del informe, no incluidas en *Scope 1* y *Scope 2*.

La seguridad en los reportes se refiere al grado de confianza en que el inventario es completo, preciso, consistente, transparente, relevante y libre de errores materiales. Aunque la seguridad no es un requisito del estándar 3, asegurar la calidad de los datos del *Scope 3* es valioso tanto para las empresas que informan como para las partes interesadas, ya que facilita la toma de decisiones basada en la información del inventario (WRI, 2011).

La responsabilidad social empresarial ante la reducción de emisiones

El Protocolo GEI reconoce que las políticas gubernamentales por sí solas no son suficientes para abordar el problema a nivel global. Por ello, se requiere el liderazgo y la participación activa de las empresas para lograr mejoras significativas. Las prácticas de Responsabilidad Social Empresarial (RSE) pueden desempeñar un papel crucial en la promoción del desarrollo sostenible y la reducción de emisiones. Cada vez más, las partes interesadas consideran la RSE como una necesidad en lugar de un lujo. El concepto tradicional de RSE aboga por un triple resultado final, que incluye perspectivas económicas, sociales y ambientales.

La Responsabilidad Social Empresarial (RSE) se ha convertido en un concepto cada vez más relevante en el mundo empresarial, ya que exige a las empresas y organizaciones asumir la responsabilidad por el impacto de sus acciones en la sociedad y el medioambiente. Existe un amplio interés en materia de investigación sobre los problemas asociados a los GEI, principalmente en países desarrollados. Sin embargo, existen aun áreas de oportunidad en cuanto a la investigación de la RSE y la reducción de emisiones (Li et al., 2021).

Algunas investigaciones han identificado que las empresas han utilizado la RSE como una herramienta de comunicación que permite lograr

buenos resultados en cuanto a su reputación, las corporaciones se involucran en temas no controvertidos alineados con su misión y objetivos. El cambio climático al ser un tema con gran polarización se considera controversial y en algunas ocasiones no conveniente para ser incluido en las políticas de RSE de las organizaciones (Vasquez, 2022).

La adopción de medidas de sostenibilidad suele resultar en una reducción del uso energético, lo que a su vez mejora los resultados financieros y disminuye las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI). Un estudio de Graafland analiza la implementación de estrategias de RSE en 22 países y encuentra una reducción en las emisiones de GEI, así como ganancias financieras modestas a largo plazo. Otros estudios, como el realizado por Loeffler (2020), destacan que las iniciativas de RSE en pequeñas y medianas empresas (PYMES) en Francia contribuyen a un aumento en la eficiencia energética.

Estos datos son relevantes para los gobiernos, debido a que pueden incorporar medidas relacionadas con la RSE como parte de los requisitos para las empresas en aras de establecer políticas más robustas para acelerar la reducción de los GEI. La implementación de nuevas tecnologías es un componente clave para las emisiones. A través de la implementación de nuevas tecnologías es posible optimizar procesos productivos, mejora en los diseños de edificios, mejora en la eficiencia de combustibles entre otros. Sin embargo, la innovación en tecnologías conlleva costos elevados, que las empresas no están dispuestas a adquirirlas o simplemente no pueden hacerlo (Loeffler, 2020).

Una de las barreras internas que las empresas deben abordar es la falta de metodologías adecuadas para la toma de decisiones en relación con la adopción de medidas contra el cambio climático. Los métodos financieros tradicionales, como el retorno de la inversión (ROI), el valor actual neto (NPV) y la tasa interna de retorno (IRR), a menudo no logran ponderar de manera adecuada los riesgos y oportunidades asociados con las alternativas de mitigación del cambio climático.

Existen alternativas para superar estas barreras mediante nuevos modelos de análisis, como el Análisis Multicriterio para el Cambio Climático (MCA4Climate), propuesto por el Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA). Es crucial que las organizaciones se man-

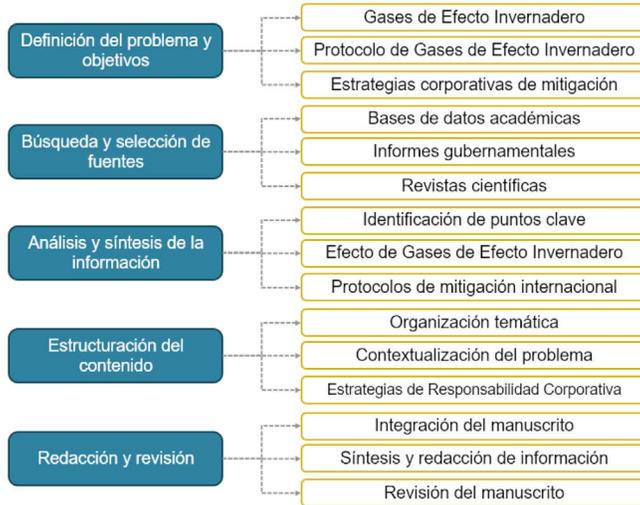
tengan a la vanguardia en la adopción de estos enfoques para enfrentar eficazmente el cambio climático y contribuir a la reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI).

Metodología

Este estudio se llevó a cabo mediante una revisión sistemática de literatura enfocada en la contaminación del aire, los gases de efecto invernadero (GEI) y el Protocolo GEI. La investigación se desarrolló siguiendo un proceso estructurado que comprendió las siguientes etapas:

1. Definición del problema y objetivos: Se identificó la necesidad de analizar la relación entre la contaminación del aire, las emisiones de GEI y las estrategias corporativas para su reducción, con un enfoque particular en el Protocolo GEI.
2. Búsqueda y selección de fuentes: Se realizó una búsqueda exhaustiva en bases de datos académicas, informes gubernamentales y publicaciones de organizaciones internacionales. Las fuentes incluyeron artículos científicos, informes técnicos y documentos oficiales relevantes.
3. Análisis y síntesis de la información: Se examinó detalladamente la información recopilada, identificando los puntos clave relacionados con las fuentes de contaminación, los efectos de los GEI, y las estrategias de mitigación empresarial.
4. Estructuración del contenido: Se organizó la información en secciones temáticas coherentes, abarcando desde la contextualización de la problemática hasta las estrategias de Responsabilidad Social Empresarial (RSE) para la reducción de emisiones.
5. Redacción y revisión: Se elaboró el manuscrito, integrando la información analizada y sintetizada, y se realizaron revisiones para asegurar la coherencia y precisión del contenido (Figura 5).

Figura 5
Fases de la metodología



Fuente: elaboración, propia, 2024.

Las fuentes consultadas incluyeron publicaciones de organizaciones como la Organización Mundial de la Salud (OMS), el Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC), la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT), el World Resources Institute (WRI), y diversas revistas científicas especializadas en sostenibilidad y medioambiente.

Se prestó especial atención a la inclusión de datos y estudios tanto globales como específicos de México, para proporcionar una perspectiva integral que abarcara tanto el contexto internacional como el nacional. Esta metodología permitió una exploración comprehensiva del tema, facilitando la integración de información actualizada y relevante sobre la contaminación del aire, los GEI y las estrategias corporativas de mitigación, con un enfoque particular en el Protocolo GEI y su aplicación en el contexto empresarial.

Discusión

El presente análisis ha puesto de manifiesto la creciente importancia que reviste la gestión de las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) en el ámbito corporativo. Esto se debe principalmente a la presión ejercida por los grupos de interés (*stakeholders*) y las regulaciones gubernamentales, quienes demandan una mayor responsabilidad ambiental por parte de las empresas.

En este contexto, el Protocolo GEI se ha consolidado como una herramienta de alcance global, reconocida por su capacidad para contabilizar y reportar las emisiones corporativas de manera sistemática. La adopción y reconocimiento mundial de este estándar, así como de herramientas como la ISO 14064, representa un gran avance en los esfuerzos por alcanzar los objetivos globales de reducción de emisiones. No obstante, el trabajo aún no ha concluido, pues existen importantes desafíos en la implementación efectiva del Protocolo GEI, especialmente en los países en desarrollo. Además, la cuantificación de las emisiones indirectas (Scope 3) a lo largo de la cadena de valor representa un reto considerable para las empresas.

En este sentido, el papel de la Responsabilidad Social Empresarial (RSE) cobra una relevancia fundamental, ya que posee un gran potencial para promover prácticas corporativas sostenibles enfocadas en la reducción de emisiones GEI. Asimismo, es evidente que abordar estas brechas requiere la creación de nuevos modelos de análisis financiero para proyectos de mitigación, así como la importancia de la innovación tecnológica.

Conclusiones

La creciente importancia de la gestión de los GEI en el ámbito corporativo se debe principalmente a la presión ejercida por las regulaciones gubernamentales y el interés de los grupos de interés (*stakeholders*). Esto ha llevado a que el Protocolo GEI se consolide como una herramienta de alcance global, reconocida por su capacidad para contabilizar y reportar las emisiones corporativas de manera sistemática. Esta estandarización representa un avance significativo en materia de transparencia y rendición de cuentas sobre la sostenibilidad empresarial. No obstante, aún persisten

importantes desafíos, como las dificultades en la implementación efectiva del Protocolo GEI, especialmente en los países en desarrollo, y la cuantificación de las emisiones indirectas (*Scope 3*) a lo largo de la cadena de valor.

En este sentido, el papel de la Responsabilidad Social Empresarial (RSE) cobra una relevancia fundamental, ya que posee un gran potencial para promover prácticas corporativas sostenibles enfocadas en la reducción de emisiones GEI. Asimismo, la adopción de un enfoque integral que aborde las emisiones GEI corporativas permitirá una combinación efectiva de estrategias regulatorias, voluntarias y de mercado.

Referencias bibliográficas

- Fajardo, M. A. L., & Ramírez, S. H. U. (2023). Evolution of Air Pollution in the Monterrey Metropolitan Area, Mexico. *Asian Journal of Environment & Ecology*, 21(1), 55-75. <https://journalajee.com/index.php/AJEE/article/view/453>
- Gramc, J., Stropnik, R., & Mori, M. (2022). A company's carbon footprint and sustainable development. [OGLJI?NI ODTIS PODJETJA IN TRAJNOSTNI RAZVOJ] *Journal of Energy Technology*, 15(3), 25-36. <http://wdg.biblio.udg.mx:2048/login?url=https://www.proquest.com/scholarly-journals/companys-carbon-footprint-sustainable-development/docview/2765804127/se-2>.
- Heiskanen, J., Brümmer, C., Buchmann, N., Calfapietra, C., Chen, H., Giesen, B., Gkritzalis, T., Hammer, S., Hartman, S., Herbst, M., Janssens, I. A., Jordan, A., Juurola, E., Karstens, U., Kasurinen, V., Kruijt, B., Lankreijer, H., Levin, I., Linderson, M.-L., & Loustau, D. (2022). The Integrated Carbon Observation System in Europe. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 103(3), E855–E872. <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-19-0364.1>
- INECC (2021). Inventario nacional de emisiones de gases y compuestos de efecto invernadero (INEGYCEI). *México ante el Cambio Climático. Sitio oficial del país*. <https://cambioclimatico.gob.mx/>
- Instituto Nacional de Ecología (2019). *Inventario Nacional de Emisiones de Gases y Compuestos de Efecto Invernadero (INEGYCEI) 1990 – 2019*. https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/671637/Edit_Factsheet_INEGYCEI_Rev_20.pdf

- Instituto Nacional de Ecología (Sf). *Manual 1: principios de medición de la calidad del aire. Manuales de monitoreo atmosférico en México.* <https://sinaica.inecc.gob.mx/pags/guias.php>
- Jiménez, A. R. M. (2010). Estimación de emisiones de gei en inventarios corporativos. realidad, datos y espacio. *Revista internacional de estadística y geografía. Año 1, No. 1.* https://rde.inegi.org.mx/rde_01/doctos/rde_01_art5.pdf
- Kasperzak, R., Kureljusic, M., Reisch, L, & Thies, S. (2023). Contabilidad de las emisiones de carbono: estado actual de las prácticas de presentación de informes de sostenibilidad según el Protocolo de GEI. *Sostenibilidad* 15(2), 994. <https://doi.org/10.3390/su15020994>
- Li, S., Cheng, W., Li, J., & Shen, H. (2021). Desarrollo de la responsabilidad social corporativa y cambio climático: evidencia regional de China. *Sostenibilidad*, 13(21), 11859. <https://doi.org/10.3390/su132111859>
- Ning, X., Lu, Y., Yim, D., & Khuntia, J. (2023). Factors Affecting the Usage Intention of Environmental Sustainability Management Tools: Empirical Analysis of Adoption of Greenhouse Gas Protocol Tools by Firms in Two Countries. *Sustainability*, 15(3), 2703. <https://doi.org/10.3390/su15032703>
- OMS (2022). Organización Mundial de la Salud. *Miles de millones de personas siguen respirando aire insalubre: nuevos datos de la OMS.* <https://www.who.int/es/news/item/04-04-2022-billions-of-people-still-breathe-unhealthy-air-new-who-data#cms>
- PNUD (2024). *Climate Promise. México, América Latina y el Caribe.* Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo <https://climatepromise.undp.org/es/what-we-do/where-we-work/mexico>
- Ramírez, S. H. U., Fajardo, M. A. L., Ortíz, B. A. D., & De la Torre, V. O. (2022). The Agricultural Sector and Climate Change in Mexico. *Journal of Agriculture and Ecology Research International*, 23(3), 19-44. <https://doi.org/10.9734/jaeri/2022/v23i330222>
- Roberto, O. S., Sônia Maria da, S. G., & Nverson da, C. O. (2018). O impacto do inventário de emissões (gee) nos desempenhos operacional e financeiro das empresas participantes do ghg. [the impact of emission inventory (ghg) on the operational and financial performance of ghg participating companies el impacto del inventario de emisiones (gee) en

- los desempeños operativos y financieros de las empresas participantes del ghg] *Revista Ambiente Contabil*, 10(2), 266-284. <http://wdg.biblio.udg.mx:2048/login?url=https://www.proquest.com/scholarly-journals/o-impacto-do-inventario-de-emissoes-gee-nos/docview/2068726886/se-2>
- Saxena, P., & Sonwani, S. (2019). *Primary Criteria Air Pollutants: Environmental Health Effects*. Criteria Air Pollutants and their Impact on Environmental Health.
- SEMARNAT (2018). *Fuentes de Contaminación Atmosférica*. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. <https://www.gob.mx/semarnat/articulos/fuentes-de-contaminacion-atmosferica>
- SEMARNAT (2024). *Factor de emisión del sistema eléctrico nacional 2023*. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/896217/aviso_fesen_2023.pdf
- Vasquez, R. (2022). CSR, CSA, or CPA? Examining Corporate Climate Change Communication Strategies, Motives, and Effects on Consumer Outcomes. *Sustainability* 14(6), 3604. <https://doi.org/10.3390/su14063604>
- WEF (2022). You've probably heard of Scope 1, 2 and 3 emissions, but what are Scope 4 emissions? *World Economic Forum*. (<https://www.weforum.org/agenda/2022/09/scope-4-emissions-climate-greenhouse-business/>).
- WRI (2004). *The Greenhouse Gas Protocol: A Corporate Accounting and Reporting Standard*. Revised Edition. World Resources Institute. Copyright © World Resources Institute and World Business Council for Sustainable Development. <https://ghgprotocol.org/sites/default/files/standards/ghg-protocol-revised.pdf>
- WRI (2011). *Corporate Value Chain (Scope 3) Accounting and Reporting Standard*. World Resources Institute. Copyright © World Resources Institute and World Business Council for Sustainable Development. https://ghgprotocol.org/sites/default/files/standards/Corporate-Value-Chain-Accounting-Reporting-Standard_041613_2.pdf
- WWF (SF). *ABC DE LA COP*. World Wildlife Fund. <https://wwf.panda.org/es/acerca/wwf/>

Capítulo 2.3

Potenciando la sostenibilidad industrial mediante sistemas de energía solar térmica

Jesús Águila León¹
Néstor Manuel Ortiz Rodríguez²
Carlos Vargas Salgado³
David Alfonso Solar⁴

<https://doi.org/10.61728/AE24004305>



¹ Profesor investigador del Departamento de Estudios del Agua y la Energía del Centro Universitario de Tonalá de la Universidad de Guadalajara. *e-mail:* jcsus.aguila@academicos.udg.mx

² Profesor adscrito al Instituto de Energías Renovables de la Universidad Nacional Autónoma de México, Morelos, *e-mail:* nmorr@ier.unam.mx

³ profesor adscrito al Instituto de Ingeniería Energética de la Universitat Politècnica de València, Valencia, España. *e-mail:* carvarsa@upvnet.upv.es

⁴ Profesor adscrito al Instituto de Ingeniería Energética de la Universitat Politècnica de València, Valencia, [España.daalso@iie.upv.es](mailto:Espana.daalso@iie.upv.es)

Introducción

En la actualidad, el suministro de energía de manera sostenible y el problema derivado de la emisión de gases de efecto invernadero son motivo de preocupación a nivel mundial. Una de las alternativas para resolver estos problemas es el uso de las fuentes de energía renovables (ER) para satisfacer la creciente demanda de energía en los diversos sectores económicos; sin dejar de lado la preocupación y mejora en la eficiencia energética (EE) y la cultura del consumo razonable de la energía en los diversos sectores consumidores.

La fuente de energía renovable de mayor importancia y de gran escala es la proveniente del sol, debemos tener presente que la radiación solar que incide sobre la tierra es el motor de otras de las fuentes de energías renovables, como son los vientos, las mareas, las lluvias e incluso la biomasa. Por lo tanto, la energía solar es una fuente abundante y la podemos aprovechar de forma directa o indirecta. En México uno de nuestros grandes retos es la transición energética de fuentes convencionales de energía a fuentes de energía renovable, en un contexto en que son escasos los instrumentos de fomento por parte de los actores del sector energético y de un marco regulatorio y entorno político complicado.

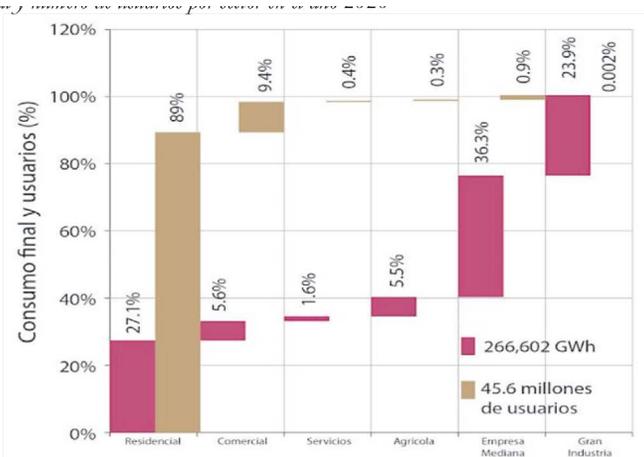
En diversos sectores económicos existen numerosos procesos que requieren energía térmica a temperaturas por debajo de los 250 °C, en la mayoría de los casos esta energía es suministrada por fuentes convencionales, cuando bien puede ser suministrada con la implementación de Sistemas Fototérmicos (dispositivos que convierten la energía radiante del sol en calor, transfiriendo ese calor a un fluido para su posterior uso). Dadas a las características geográficas del país se cuenta con un gran potencial para el aprovechamiento del recurso de radiación solar. Utilizar la energía solar fototérmica permitirá a corto plazo sustituir parcialmente las fuentes convencionales para la generación de calor de procesos y largo plazo lograr un cambio radical en la matriz energética que garantice el suministro energético para asegurar el crecimiento económico del país.

La energía solar térmica es un recurso renovable, “gratuito” y disponible en la gran mayoría del país, lo que representa una opción atractiva para suministrar la demanda térmica industrial respetando el medioambiente, y contribuyendo a la implementación de una “industria ecológica”.

Contexto energético en México

En México, el consumo energético total del año 2022 fue de 333 662 GWh, un incremento del 3.4 % en comparación con los consumos del año 2021 (Quartux, 2023). Este crecimiento muestra la creciente demanda de energía en los diferentes sectores económicos del país, pese la complicada situación económica y social que planteó la pandemia del virus del COVID-19. Cuando se analiza a nivel macro la matriz energética de un país es importante considerar todas sus actividades y sectores consumidores, un análisis a esta escala puede realizarse mediante la distribución sectorial de consumos energéticos. La distribución del consumo de energía final para México en el año 2020 muestra que los sectores de empresa mediana y gran industria son de los mayores consumidores, con un 36.3 % y un 23.9 % de la demanda total de energía, además, siendo notable que ese consumo de energía es realizado por el menor número de usuarios, 0.9 % para empresa mediana y 0.002 % para la gran industria, del total de 45.6 millones de usuarios (SENER, 2021) (Figura 1).

Figura 1
Consumo final y número de usuarios por sector en el año 2020

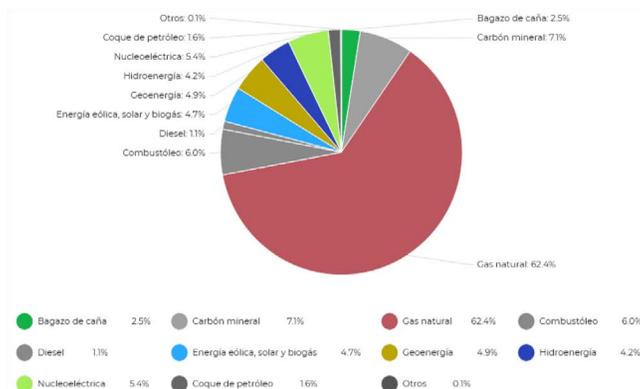


Fuente: SENER, 2021.

Para el año 2020, las principales fuentes de energía para el sector industrial en México son el gas natural y la electricidad, consumiendo este sector el 36.8 % de la energía que utiliza proveniente de gas natural y un 32.9 % de electricidad, generada de diversas fuentes (REPSOL, 2020). Es interesante notar cómo más de una tercera parte de la energía que se consume en el país proviene del gas natural, y, consecuentemente, tiene efectos negativos sobre el medioambiente asociados a las fuentes energéticas de origen fósil, sin considerar además su eventual y próximo agotamiento de los yacimientos (Figura 2).

Figura 2

Consumo de energía para generación de electricidad por tecnología



Fuente: CONAHICYT, 2023.

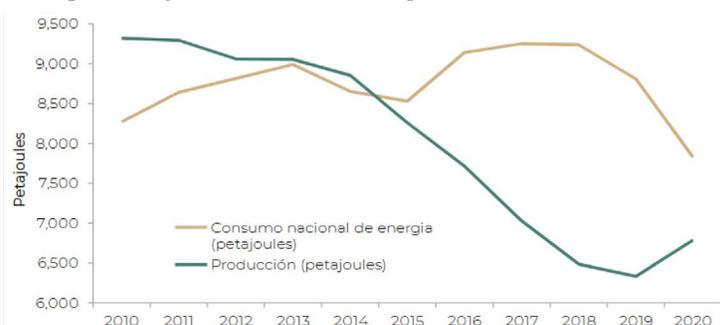
La agenda global derivada de diversas convenciones y tratados, como el acuerdo de París, muestra una clara dirección de transición para una mayor penetración de fuentes de energía renovables. Sin embargo, la realidad es más complicada que las metas fijadas en dichos acuerdos y convenciones, puesto que cada país tiene un entorno único y cambiante. En México, por ejemplo, la capacidad de generación basada en energías renovables ha experimentado altibajos a lo largo de los años en México. En el año 2022, la generación basada en energía eólica y fotovoltaica disminuyó en un 3.6 % y 4.6 % respectivamente, luego de haber tenido incrementos continuos durante varios años (García, 2023).

Este retroceso puede atribuirse a cambios recientes en el plano sociopolítico de México, donde se cancelaron las subastas energéticas y hubo importantes cambios estructurales en el sector energético de México impulsados por el gobierno federal dando prioridad al uso de combustibles fósiles, siendo esto un problema para el futuro energético del país si no va acompañado de un claro programa de apertura e integración de tecnologías de generación basadas en energía renovables para un mediano y largo plazo. En la actualidad, la generación basada en energías renovables en México representa aproximadamente el 26.1 % de la generación total de electricidad en el país, porcentaje muy por debajo de la meta del 35 % establecida en la Ley de Transición Energética (Secretaría de Energía, 2016).

En nuestro país la infraestructura de generación de energía depende en gran medida de importaciones, especialmente de gas natural. Cerca del 83 % del gas natural que se consume en el país es importado, en su mayoría proveniente de los Estados Unidos de América (García, 2022), significando esto que la producción nacional es insuficiente para cubrir las necesidades energéticas, sobre todo a nivel industrial. En la Figura 3 se muestra la evolución entre consumo y producción de energía en México del año 2010 al 2020. Esta situación, en que el consumo energético supera a la producción nacional y la necesidad de importar energéticos es un claro síntoma de insostenibilidad de los cambios recientes para el sector energético en el país, y es un llamado para tomar cartas en el asunto para lograr la autonomía energética a través de una matriz energética diversa, que no considere únicamente a los combustibles fósiles, que tienen fecha de caducidad por agotamiento de sus yacimientos, sino a través de la integración de generación distribuida y diversas fuentes de energía, especialmente de origen renovable.

Figura 3

Evolución de la producción y consumo nacional de energía en México



Fuente: SENER, 2020.

Como puede apreciarse en la anterior Figura 3, a partir de 2015, el consumo nacional superó a la producción de energía, en un 15.36 %. Este comportamiento nos alerta del nivel de independencia energética de nuestro país. La independencia energética es el índice internacional utilizado para medir el grado en que un país puede cubrir su consumo de energía mediante producción de energía propia, si el índice es mayor que 1 se considera que es un país autosuficiente.

Para finales del año 2020, según (SENER, 2020), México tenía un índice de independencia de 0.87. Como se mencionó con anterioridad, para el año 2022, el 83 % del gas natural fue importado, y gran parte de ese recurso es empleado por la industria, lo cual significa que no hay capacidad de generación suficiente en territorio nacional para abastecer de energía a este sector.

El sector industrial es el segundo mayor consumidor de energía en el país, de acuerdo con información de 2022 absorbió 26.27 % del consumo energético total, equivalente a 1476.99 PJ (SENER, 2022). El gas natural, fue el combustible más utilizado en la industria, aportó 54 % del consumo del sector en 2022, mientras que la electricidad representó 49.9 %. El consumo restante fue de combustibles en su mayoría de petrolíferos (SENER, 2022).

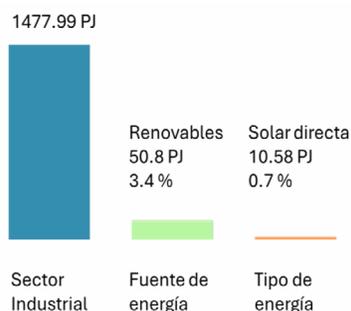
El rubro “otras ramas” corresponde a las industrias menos intensivas, en su mayoría pequeñas y medianas empresas (PYMES), como: alimentos, textil, madera, cuero, productos de cerámica, entre otros. Del total de los

1477.99 PJ de energía que la industria consumió en México durante el año 2022, el 49.9 % corresponde a la demanda de electricidad por parte de industria menos intensiva, equivaliendo a 737.51 PJ.

Esta energía se utiliza principalmente para su transformación en energía mecánica para usos específicos y, en algunos casos, en energía térmica (SENER, 2022). En la figura 4 se presenta la aportación de energías renovables al sector industrial.

Figura 4

Participación de la energía renovable en el consumo energético del sector industrial



Fuente: Elaboración propia con datos de SENER, 2022.

Como puede apreciarse en la anterior figura, solo el 3.4 % del total de energía que demanda el sector industrial proviene de energías renovables, y solo el 0.7 % viene del uso de energía solar directa para procesos de calor en la industria.

Importancia del sector industrial

El sector industrial es un elemento crucial para el desarrollo económico del país debido al impacto que puede tener en los niveles de empleo, inversión y por ende en el crecimiento de la economía. En México la industria cerró el 2022 con una contribución al producto interno bruto (PIB) del 25.6 %, según datos del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI, 2023a). Esto representó una disminución en comparación del 31.1 % reportado por la misma institución en el año 2010. Sobre la generación de empleo, la industria de la manufactura es la principal fuente de

trabajo del sector, empleando a 7.4 millones de personas en 2022, lo cual representa el 22.2 % del empleo total en México.

Es importante considerar que, la estructura de la industria en México ha cambiado en los últimos años. En el año 2022, las manufactureras representaron el 52.4 % del total de participación en el sector, seguidas por la industria de la construcción con el 23.5 %, la minería con el 14.7 % y la industria de la electricidad, el agua y el suministro de gas a consumidor final con el 9.4 % (INEGI, 2023b). Actualmente, el sector industrial enfrenta importantes desafíos, como la baja productividad, una alta informalidad y una importante dependencia de mercados externos.

Gran parte del sector industrial en México se encuentra formado por Pequeñas y Medianas Empresas (PYMES), las cuales representan el 99.8 % del total de empresas del país. En el año 2022, estas PYMES generaron el 72.2 % de la población ocupada y obtuvieron ingresos equivalentes al 25.3 % del Producto Interno Bruto (PIB) según información del (INEGI, 2023a). En el año 2010 el 70 % de las PYMES no contaba con bases tecnológicas instaladas, mientras que para 2022, el 62.5 % de las PYMES ya utilizan internet para sus actividades, y el 38.5 % utilizan el mercado electrónico.

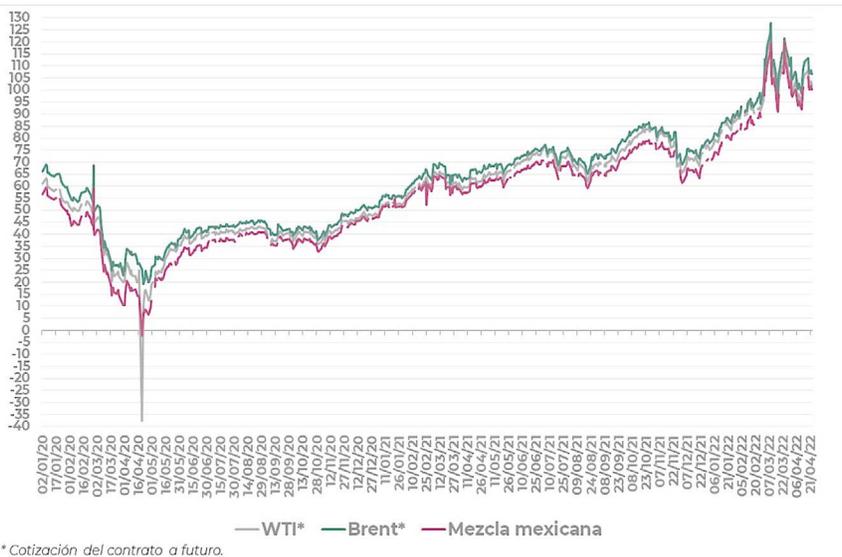
Estos datos muestran la tendencia y disposición de las empresas mexicanas para la adopción de nuevas tecnologías. Es necesario que México se eleve al siguiente nivel de industrialización, mediante la promoción de actividades que impulsen sectores de algún valor agregado. En este sentido, el gobierno mexicano ha implementado a lo largo del tiempo diversas iniciativas para apoyar el desarrollo de las PYMES, como el Programa Nacional de Apoyo a las Micro, Pequeñas y Medianas Empresas 2020-2024 y el Programa Nacional de Financiamiento para Micro, Pequeñas y Medianas Empresas.

Uno de los factores claves para incrementar la competitividad del sector industrial es disminuir los costos de producción, gran parte de estos debido al consumo de combustibles que en su mayoría se utiliza para la generación de calor de proceso, es decir, para aplicaciones térmicas de entre 80°C y 250°. La ruta convencional que utiliza sector industrial mexicano para obtener la energía térmica que se requiere en los procesos es mediante combustibles fósiles, y comúnmente, con tecnología poco eficiente.

La fuente de combustible más común que se utiliza para proporcionar calor de proceso en el sector industrial en México, y muchos otros países, es el gas natural. Los precios del gas natural están a un cierto nivel indexados a los precios del petróleo, y de acuerdo con algunos estudios se espera que aumente en el futuro cercano, a pesar de su inestabilidad. Con los precios fluctuantes y con el eventual agotamiento de los combustibles fósiles, así como los efectos ambientales que ocasionan estos; se deben implementar acciones en el sector industrial para disminuir los costos de producción y poder incrementar la competitividad del sector.

En la figura 5 se puede observar la tendencia creciente del precio del petróleo de la mezcla mexicana, el crudo West Texas Intermediate (WTI) y Brent, en el periodo del 2009 al 2012.

Figura 5
Precios de mezcla mexicana de exportación, WTI y Brent, 2020-2022 (dólares por barril)



* Cotización del contrato a futuro.

Fuente: Gobierno de México, 2022.

Aunque a mediados del año 2020 los precios internacionales del petróleo se desplomaron, es un hecho que los hidrocarburos fósiles son finitos y cada vez más difíciles de extraer, y, por lo tanto, en algún momento la tendencia creciente continuará. En 2023, la relación de reserva-producción

(R/P) de petróleo se ubicó en 48.7 años a nivel mundial y para México 8.5 años. En los últimos años la producción petrolífera en México ha ido disminuyendo debido a la menor producción en sus campos petrolíferos que se encuentran en declive, principalmente el Activo de Cantarell, aunado a esto los nuevos yacimientos resultan ser de menor tamaño o bien su desarrollo es muy costoso.

Una opción para elevar la competitividad y generar valor agregado dentro del propio sector industrial es el uso de las energías renovables. Esto a su vez permitirá mitigar en parte la degradación ambiental y posponer el uso de los combustibles fósiles. En el caso particular de la sustitución de combustibles fósiles para la obtención de energía térmica, se tienen como opción del uso de la energía solar directa. Una de las ventajas competitivas de uso de la energía fototérmica respecto a los combustibles fósiles, es que el precio del recurso solar es prácticamente nulo. Sin embargo, la inversión de capital inicial para la implementación de la tecnología solar es relativamente mayor a la tecnología convencional; cabe mencionar que la inversión se amortiza con el ahorro del consumo de combustible durante su vida útil.

Ante este panorama son muchos los desarrollos tecnológicos para el aprovechamiento de la energía del sol en formas útiles, algunas de estas tecnologías se encuentran maduras, pero con poca difusión sobre todo en el sector industrial, este es el caso de los sistemas de captación o colectores solares que se usan para la obtención de energía térmica. Los colectores pueden ser clasificados por su rango de temperaturas en los de baja (30 – 80 °C), media (60 – 300 °C) y alta temperatura (300 – 2000 °C) (Kalogirou S. A., 2009). Existen diversas tecnologías para los diferentes rangos de temperaturas, para bajas temperaturas se encuentran los colectores planos, para temperaturas medias están los colectores de tubos al vacío o evacuados, los parabólicos compuestos (CPCs), los concentradores de canal parabólico (CCPs) y los colectores tipo Fresnel; para altas temperaturas se encuentran los de disco parabólico y los de torre central.

Considerando lo anterior, los sistemas de captación solar podrían sustituir una parte importante de la energía térmica proveniente de los combustibles fósiles y proporcionar parte de las necesidades energéticas del sector industrial y otros sectores económicos. A partir de la implementa-

ción de estas tecnologías, inicialmente a pequeña escala, en el sector industrial mexicano se podría permitir una maduración técnica y económica de la tecnología, y los beneficios podrían presentarse a corto plazo.

Calor solar para procesos industriales

La generación de calor de proceso industrial de mediana temperatura (80 a 250°C) se ha identificado como un sector prometedor, aunque aún poco explorado para la energía solar térmica, debido principalmente al enorme tamaño de mercado, ya que representa una parte importante del consumo total de energía primaria (Ramaiah y Shashi Shekar, 2018; Saini et al., 2023).

Según las últimas estadísticas de la Agencia Internacional de Energía (AIE) estadísticas para el año 2022, la industria es uno de los principales consumidores de energía en todo el mundo, alrededor del 31 % (IEA, 2023). De la energía total usada en la industria, entre el 40 % y el 60 % corresponde a la energía térmica directa, llamada Calor de Proceso Industrial (IPH del inglés Industrial Process Heat), el cual está por debajo de los 300°C. En particular, el 35 % de la demanda de energía térmica industrial está en el rango de 92-204°C (Vannoni y colab., 2008), lo cual representa una oportunidad significativa para implementación de tecnologías de calentamiento basadas en energías renovables, como la energía solar térmica o biomasa sostenible.

Solo un pequeño porcentaje (menos del 5 %) de la energía se utiliza para aplicaciones de baja temperatura (por debajo de 100° C). Alrededor del 30 % de la energía satisface aplicaciones intermedias (100-176 °C), el restante para temperaturas más altas (Larson y West, 1996). Particularmente en México, un estudio realizado dentro PYMES industriales de alimentos y textiles ha establecido que el 68 % del consumo total de energía es en forma de energía térmica, la mayor parte es suministrada por gas licuado seguido gas natural y diésel (IIE, 2011). Ramos y colaboradores estiman que el potencial de mercado para aplicaciones de calor solar de procesos industriales (alimentos y textil) en México podría ascender a 0.47PJ (Ramos et al., 2014).

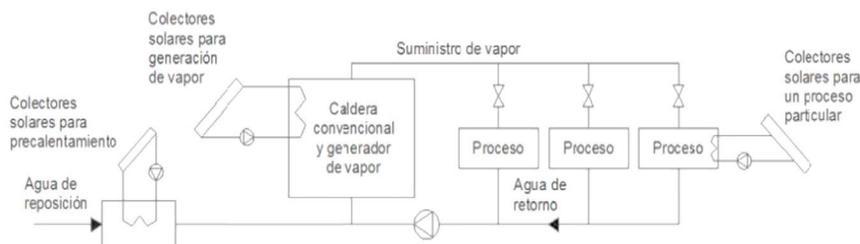
El interés en el uso de sistemas de energía solar para el suministro de la energía térmica requerida por la industria no es solo porque gran parte de

esta energía se consume en este sector, sino también porque las aplicaciones industriales ofrecen la posibilidad del uso más eficiente y económico de la energía solar debido a que las demandas térmicas anuales suelen ser constante, no estacional y predecibles, lo que permite un diseño eficaz, y usualmente la industria cuentan con personal capaz de realizar el mantenimiento a los campos solares, lo que garantiza el funcionamiento del sistema con la máxima eficiencia; y además la instalación de grandes campos de colectores ofrecen el potencial de las economías a escala (Kutscher, 1982; Larson y West, 1996).

En la industrial la instalación de los colectores solares al sistema convencional de suministro de calor se podría hacer en varios puntos, por ejemplo, se puede acoplar directamente a un proceso específico o al calentamiento de agua y aún más a la generación de vapor, como se puede observar en la figura 6.

Figura 6

Opciones para acoplar los sistemas fototérmicos con suministros de calor existentes



Fuente: elaboración propia, 2024.

Las potenciales industrias para el calor solar de procesos industriales son los plásticos, textiles, alimentos, papel, química y la industria de tratamiento de superficies, y los procesos más adecuados son la limpieza, secado, evaporación y destilación, escaldado, pasteurización, esterilización, la cocina, la fusión, la pintura y la superficie tratamiento (Vannoni et al., 2008). En la Tabla 1 se presentan el intervalo de temperaturas requeridas para algunas industrias (Kalogirou, 2003).

Tabla 1

Rango de temperaturas para diferentes industrias

Industria	Rango de temperatura °C	Intensidad del calor
Alimentos	30-120	Baja
Bebidas	60-90	Baja
Papel	60-150	Baja
Tratamiento de superficies metálicas	30-80	Baja
Textil	30-180	Baja-Mediana
Química	120-260	Mediana
Plástico	120-220	Mediana
Pre calentamiento de agua para calderas	30-100	Baja
Refrigeración solar	55-180	Baja-Mediana
Calefacción en fábricas	30-80	Baja

Fuente: elaboración propia, 2024.

A pesar del enorme potencial de los sistemas fototérmicos, aún no existe una presencia importante de plantas solares operando para la generación de calor de procesos industriales. Las principales barreras que impiden el mayor despliegue son las siguientes (IRENA et al., 2015):

- a) Los altos costos de inversión y la falta de opciones de financiamiento.
- b) La falta de difusión y transferencia de información técnica, en especial a los que toman las decisiones dentro de las empresas; también la falta de experiencias de primera mano.
- c) La falta de herramientas y directrices de diseño adecuado.
- d) Cuestiones de escala; ya que los emprendimientos son para grandes empresas.
- e) Precios de los combustibles fósiles y los subsidios al sector industrial.

En resumen, se pretende atender la problemática del suministro energético de los sectores económicos del país, en especial de las PYMES del sector industrial, para elevar la competitividad de estos sectores haciendo énfasis a la sustentabilidad (económica, social, ambiental e institucional).

Una opción al problema

Con los antecedentes expuestos es un hecho contundente que, para garantizar el desarrollo sustentable del país, es indispensable elevar el nivel tecnológico y de innovación dentro del sector industrial, en especial de las PYMES. La implementación de sistemas de energía solar para suministrar la energía requerida por la industria permite la manufactura limpia, que de acuerdo con (Despeisse et al., 2012), tiene un papel importante en la evolución hacia una sociedad más sostenible. Además de ser un factor clave para la competitividad empresarial.

Para abatir la problemática es necesario partir de las barreras que obstaculizan la implementación de los sistemas de energía solar en la industria. Estas pueden tomarse como oportunidades para implementar esquemas técnicos y financieros mediante la creación de Empresas de Servicios Energéticos (ESCO por sus siglas en inglés *Energy Services Companies*) que promuevan proyectos para el aprovechamiento de energía solar dentro del sector industrial, con el fin de impulsar el desarrollo económico y sustentable del país.

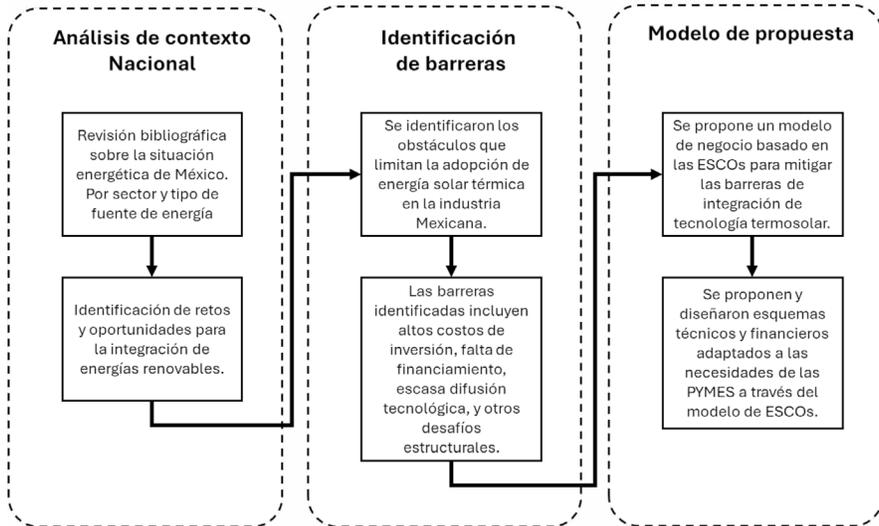
Metodología: modelo de ESCOS como base para implementación de tecnología termosolar

Las ESCO, son organizaciones que proporcionan servicios energéticos en las instalaciones de un usuario determinado, estando el pago de los servicios basados en la obtención de ahorros de energía. Estos ahorros se conseguirán a través del desarrollo de mejoras de la eficiencia energética o mediante la implantación de ER. En resumidas cuentas, ese concepto de negocio o modelo de negocio de las ESCO.

En este trabajo se propone un modelo de ESCO. El enfoque metodológico para nuestra propuesta se estructura en diferentes etapas, que luego de análisis y una revisión bibliográfica hemos identificado para abordar de manera efectiva la implementación de tecnología termosolar en la industria, y siendo al mismo tiempo un modelo económicamente viable para el sector privado. El diagrama de la figura 7 muestra la metodología que se siguió para realizar la propuesta que se presenta, basada en ESCO.

Figura 7

Diagrama metodológico para la elaboración propuesta de modelo basado en ESCO para la integración de tecnología termosolar en la industria mexicana.



Fuente: elaboración propia, 2024.

Como puede apreciarse en la anterior Figura 8, la propuesta que se presenta en este trabajo sobre la integración de tecnología termosolar en la industria mexicana a través de un modelo de ESCO parte de un previo análisis de la situación y contexto nacionales actuales en el sector energético de la industria. En el apartado anterior se menciona la fuerte dependencia nacional a combustibles fósiles e importaciones, lo cual afecta de manera importante a la industria. Esta dependencia a los combustibles fósiles y las importaciones de energéticos es un área de oportunidad para la integración de diferentes tecnologías de renovables. Las principales barreras que se identificaron fueron los elevados costos de inversión para la implementación de tecnologías renovables en el sector industrial, falta de esquemas claros de financiamiento, poca difusión tecnológica entre otros.

Ante este panorama un modelo basado en ESCO puede ser muy atractivo, puesto que es una alternativa que provee de una base sólida entre las empresas que proveen la tecnología y los usuarios finales. En la siguiente sección se detalla esta propuesta.

Modelo propuesto basado en ESCO

El elemento diferenciador de las ESCO con otros proveedores de servicios energéticos es el Contrato de Prestaciones Energéticas (EPC por sus siglas en inglés Energy Performance Contract). Este se basa en una relación contractual entre la ESCO y el cliente, en el cual la ESCO garantiza unos ahorros de energía y, por tanto, económicos, que se utilizarán para amortizar las inversiones. Cabe mencionar que las ESCO inicialmente (en la década de los ochenta) se enfocaron a las mejoras de eficiencia energética, por lo que, la implementación de ER es más reciente.

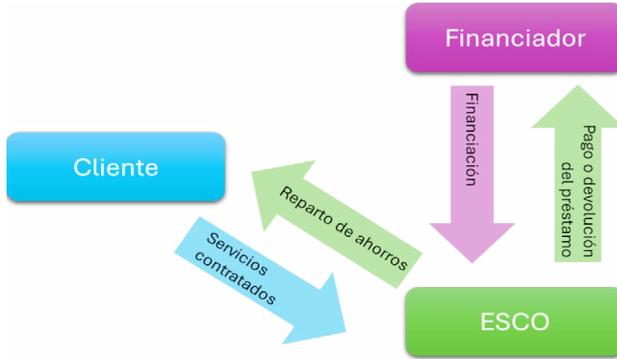
Existen variaciones en las formas en que opera una ESCO, pero la diferencia clave radica en proporcionar financiamiento o no para el proyecto que se está desarrollando. La elección de la financiación depende de varios factores, en particular, conocimiento del acreedor del proyecto, la calificación crediticia de la ESCO y el cliente, y las reglas de contabilidad. Básicamente, hay tres diferentes opciones de financiamiento: por la ESCO, por los clientes y financiación por terceros (FT). La primera se refiere a la utilización de los fondos de la ESCO, ya sean propios o acuerdos de arrendamiento.

La financiación por clientes implica el uso de los fondos de estos, cubiertos por la garantía de ahorro de energía proporcionada por la ESCO. La FT es una modalidad en la cual se involucra a un tercer agente (entidad crediticia) en la relación contractual de la ESCO y el cliente (Bertoldi et al., 2006). Básicamente hay dos modelos de contrato de ESCO: ahorros compartidos y ahorros garantizados, el rasgo distintivo es la fuente de financiamiento. En el esquema de ahorro compartido la inversión asociada al proyecto es asumida completamente por la ESCO, en muchos casos con recursos propios.

Durante la vigencia del contrato, las instalaciones son propiedad de la ESCO, el cliente paga una cuota determinada a la ESCO y se reparten un porcentaje del ahorro obtenido. De esta forma, el cliente obtiene beneficios de manera inmediata sin tener que pagar una inversión inicial, sin embargo, comparte el riesgo de rendimiento y en ocasiones del precio de la energía con la ESCO, mientras que la ESCO asume el riesgo de crédito. En la figura 8 se presenta un esquema de esta modalidad.

Figura 8

Esquema de las relaciones entre las partes en la modalidad de ahorros compartidos



Fuente: elaboración propia, 2024.

En el caso de ahorros garantizados, la inversión asociada al proyecto de eficiencia energética es asumida completamente por el cliente y la ESCO garantiza un determinado ahorro, normalmente en forma de porcentaje. En el caso de que el ahorro obtenido se encuentre por debajo del garantizado, la ESCO debe abonar la diferencia al cliente. En relación con el reparto del riesgo, el cliente asume el riesgo de crédito y, habitualmente, el riesgo asociado al precio de la energía, mientras que la ESCO asume el riesgo de obtención del rendimiento. En la figura 9 se presenta un esquema de esta modalidad.

Figura 9

Esquema de las relaciones entre las partes en la modalidad de ahorros garantizados



Fuente: elaboración propia, 2024.

La contratación de ESCO tiene ventajas frente a otro tipo de contratistas, tanto técnicas como financieras, estas dependen de la modalidad del contrato.

Ventajas técnicas:

- a) Renovación tecnológica de sus instalaciones, mejorando la competitividad y los activos productivos de la empresa.
- b) Las ESCO basa su beneficio en el ahorro energético como tal. Este incentivo es muy relevante a efectos de consecución de resultados técnicos.
- c) Se dispone de un equipo técnico con conocimiento y experiencia sobre qué proyectos son más rentables y ahorran más energía en cada sector.
- f) Las ESCO se aseguran de la implementación del proyecto y de que este funcionando de acuerdo con las especificaciones acordadas, mediante el monitoreo y mantenimiento.

Ventajas financieras:

- 1) Las ESCO pueden proporcionar financiación, lo que permite al industrial disponer de sus recursos financieros para otros proyectos, es decir, mantener su capacidad de endeudamiento y, por lo tanto, de inversión.
- 2) Todos los gastos incurridos en las reparaciones destinadas al ahorro de consumo energético son asumidos por las ESCO.
- 3) Reducción inmediata de los costes energéticos.
- 4) Al final del periodo de contratación, el cliente puede ser propietario de los sistemas sin inversión previa.

En un contexto más amplio, teniendo en cuenta que la EE y la ER son una característica fundamental de la energía sostenible, el desarrollo de las ESCO podría, a su vez, promover la interacción exitosa entre la sociedad y el medioambiente. Además, las ESCO tienen un gran potencial como fuente de creación de empleo.

Entre los años 1990 y 2000, la industria estadounidense de ESCO ha entregado alrededor de \$15 mil millones de dólares en ahorros en costos de energía neta a través de sus servicios a grandes clientes institucionales, comerciales e industriales. Las ESCO han seguido creciendo a tasas anual

10-25 % a pesar de un entorno empresarial caótico, complejo e incierto. Las ESCO estadounidense han demostrado con éxito que los EPC, en combinación con otras políticas de apoyo, se puede utilizar para abordar y superar muchas barreras de mercado (Goldman et al., 2005).

En México, las ESCO cuentan con aproximadamente 10 a 18 años de experiencia, existen en el mercado cerca de 40 ESCO que cuentan con la estructura y capacidad de ejecución para implementar proyectos bajo la modalidad de contrato por desempeño o EPC (AMENEER, 2023). Sin embargo, muchas de esas no pueden ser consideradas estrictamente ESCO, ya que a pesar de proporcionar algunos servicios de eficiencia energética (diseño y construcción), por lo general, no se involucran en los EPC. Los casos de éxito que se presentan en México se enfocan básicamente al sector turismo y la administración pública. Los pocos casos en la industria se relacionan al ahorro de electricidad (iluminación y factor de potencia), mientras que los proyectos de calor de proceso son casi nulos.

Desde una perspectiva teórica las ESCO deben estar en todas partes, dado el enorme potencial de la implementación rentable de EE y ER, independientemente del país o la industria (IEA, 2007). Sin embargo, este no es el caso, ya que tienen barreras que frenan el desarrollo y crecimiento de las ESCO en el mercado. Aunque cada país y sector es diferente, existen varias barreras comunes, (ver Anexo). En el caso particular de México, las barreras son las siguientes (Vine, 2005):

- i) La falta de financiación.
- ii) Los clientes no están familiarizados (informado, bien informado, consciente) o interesados (o tienen otras prioridades) en los contratos de prestaciones energéticas.
- iii) La falta de consultores y empresas (experiencia en finanzas e ingeniería) en CPE.
- iv) Percepción del riesgo (ESCO son inusuales /nuevas y falta de confianza).

Algunas de estas barreras son consistentes con las barreras para la implementación de la energía solar en la industria, esto debido a la interdependencia de ambos temas, la energía.

El modelo de negocios de las ESCO debe ser visto como parte de una cartera de opciones para la implementación de la energía solar en la

industria, no como la única solución. Tanto académicos como profesionales sostienen que las mejores empresas en este nuevo entorno dinámico son aquellas que son capaces de sacar provecho de las crisis y cambios importantes; y en consecuencia ajustar sus modelos de negocio (Casadesus-Masanell y Ricart, 2010). Tomando en consideración esta premisa es necesario reestructurar el modelo de negocio de las ESCO partiendo de los obstáculos que se presentan. A continuación, se presenta una propuesta innovadora para potenciar el desarrollo y crecimiento de las ESCO.

a) Valor agregado de la propuesta

Ante lo expuesto queda claro que las ESCO representan una opción a la problemática, ya que son un medio atractivo para la implementación de proyectos de EE y ER en la industria. Sin embargo, primero hay que romper las barreras que impiden el desarrollo tanto de las ESCO como de la implementación de energía renovable en la industria. Para ello, es necesario reestructurar e innovar los esquemas de gestión, financieros y técnicos con los que operan actualmente las ESCO, es decir, reestructurar el modelo de negocio. La propuesta de modelo de negocio debe de considerar los siguientes puntos:

b) Incentivos extras

En el marco actual de las ESCO el objetivo focal ha sido el ahorro de los costos de energía, sin embargo, la implementación de sus servicios (EE o ER) brindan beneficios ambientales, como la reducción de las emisiones de CO₂. Desde un punto de vista de economía ambiental, es necesario y factible incluir tales beneficios ambientales en un marco de evaluación económica, es decir, gestionar el “pago por servicios ambientales”. Una alternativa es mediante programas ambientales bien desarrollados como el Mecanismo de Desarrollo Limpio (MDL).

Esta es una opción sólida para evaluar el valor ambiental agregado de los proyectos de energía amigable con el ambiente de los países en desarrollo, como México. El MDL fue desarrollado como un medio para reducir las emisiones de carbono de manera rentable, al permitir que los países

desarrollados puedan invertir en proyectos para reducir las emisiones de gas de efecto invernadero en países en desarrollo y obtener así Certificados de Reducción de Emisiones (CRE), mediante la compra de estos.

La implementación de MDL implica principalmente actividades de auditoría energética, monitoreo y verificación de los proyectos. Estas actividades también las realiza una ESCO como parte de sus servicios, por lo tanto, es factible combinar los marcos de una ESCO y el MDL para generar valor agregado económico y promover aún más las actividades de conservación de la energía en los países en desarrollo.

La simbiosis entre la ESCO y los MDL aumenta el incentivo para introducir sistemas de energía solar en la industria, ya que reducen el tiempo de retorno de la inversión por debajo del valor máximo y conduce a mejores resultados económicos y ambientales, así como la asignación de beneficios más racional.

c) Economía de escala

Las PYME son un mercado interesante para la implementación de sistemas solares por tres razones. En primer lugar, su costo operativo para la obtención de energía térmica convencional es más elevado que las grandes empresas, por lo tanto, los ahorros pueden ser mayores. En segundo lugar, las demandas de calor por empresa son relativamente pequeñas en comparación con la industria de alto consumo energético, lo que facilita la integración de sistemas fototérmicos. En tercer lugar, el gran número de PYME existentes podría dar lugar a la rápida disminución de los costos debido a que a la experiencia que se va adquiriendo.

Conjugando estas tres razones se propone la iniciativa de realizar la integración de un conjunto de proyectos el mismo sector con el fin de hacer más eficiente el uso de los recursos que se emplean en la cadena de valor de ESCO, sobre todo el poder realizar la adquisición de los equipos a gran escala permitiendo disminuir los costos.

d) Huella ecológica

En toda empresa industrial hay un conjunto de inversiones rentables, pero no se puede invertir en todos ellos. A pesar de los ahorros que se pueden

generar con la implementación de los proyectos de EE y ER dentro de la industria, estos compiten con otras opciones más rentables ante los actuales criterios de elección de inversiones dentro de la industria. En la mayoría de los casos las inversiones de EE y ER se realiza únicamente por coincidencia ambiental de la propia empresa, pero sin gran incentivo más que la satisfacción de ser una organización responsable con el medioambiente.

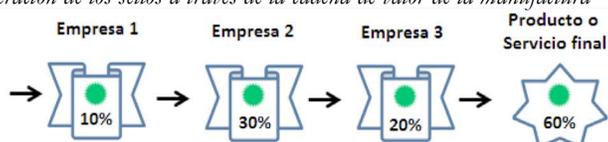
La sociedad está cada vez más consciente del desarrollo sostenible y de su propia responsabilidad social. Es por ello por lo que la “mercadotecnia verde” ha evolucionado en las últimas décadas y continuará haciéndolo en la medida de que mayor número de consumidores desarrollen una mayor conciencia sobre la necesidad de proteger el medioambiente. Con sus decisiones, los consumidores no solamente determinan el nivel de uso de energía en forma directa, sino también influye en importantes asignaciones de recursos y procesos de producción.

Otra opción para incentivar la implementación de EE y ER en la industria, es mediante una estrategia de mercadotecnia verde. Esto se puede lograr en parte con la implementación de un distintivo o sello ecológico (herramienta visual) que permita informar y avisar sobre el nivel de prácticas ecológicas y uso de energías renovables involucradas en la elaboración de productos y servicios por parte de empresas.

El sello ecológico representará una certificación ambiental otorgada por las ESCO. Los sellos tendrán la característica innovadora de ser dinámicos y cuantitativos, dejando atrás los clásicos indicadores pasivos y cualitativos. Estas características permitirán al consumidor cuantificar el nivel de manufactura ecológica de los bienes y servicios que adquieren. Debido a que en algunos casos la manufactura se realiza a través de diferentes empresas, entonces el sello aplicará tanto a las empresas como a los productos o servicios finales, en la figura 10 se puede ver un esquema de operación de los sellos.

Figura 10

Esquema de operación de los sellos a través de la cadena de valor de la manufactura



Fuente: elaboración propia, 2024.

De esta manera, y de acuerdo con la anterior Figura 10, un producto o servicio final hipotético con un sello del 100 % significa que dicho producto en toda su trazabilidad en su cadena de valor ha sido manufacturado o realizado en su totalidad con prácticas ecológicas y energías renovables, en el ejemplo de la Figura 10, el producto final es solo un 60 % “ecológico” puesto que las tres empresas anteriores tienen porcentajes de sello ecológico del 10 %, 30 % y 20 % respectivamente. La implementación de estos sellos en productos y servicios puede tener importantes repercusiones sobre la conciencia de la población para el fomento del consumo de productos y servicios que cuenten con mayor grado de sostenibilidad ambiental. Una empresa con sello ecológico formará parte de un catálogo de empresas ecológicas, lo que le permitirá ser elegida por otras empresas que requieran sus productos o servicios, con el fin de garantizar lo más posible una manufactura ecológica.

e) Financiamiento flexible

El financiamiento es una de las piezas claves en el modelo de negocios de una ESCO. Por lo tanto, se proponen replantear los esquemas tradicionales de financiamiento, a continuación, se presentan algunas de las propuestas:

- a) **Financiamiento mixto:** Esta propuesta consistirá en el financiamiento de la inversión por parte de más de uno de los actores tradicionales de los modelos de financiamiento. Un financiamiento mixto básico puede ser entre la ESCO y la empresa contratante, este tipo de financiamiento puede permitir al contratante estar más involucrado en el proyecto y reducir la duración del contrato. Otro financiamiento mixto puede ser uno múltiple, en el cual además de la ESCO y de la empresa contratante participan otras entidades crediticias ya sean públicas o privadas.
- b) **Financiamiento garantizado:** Este consistirá en un financiamiento otorgado mediante un derecho real de garantía. Este derecho se constituye para asegurar el cumplimiento del pago del crédito otorgado, que confiere a su titular el derecho de realización de valor de un bien, el cual, aunque gravado, permanece en poder del contratista del crédito, pudiendo el acreedor disponer de la garantía en caso del incumplimiento de las obligaciones.

f) Diversificación de los servicios

De forma genérica las ESCO tienen una cadena de valor para la implementación de proyectos como se muestra en la Figura 11.

Figura 11

Cadena de valor de una ESCO



Fuente: elaboración propia, 2024.

Haciendo uso de los diferentes servicios con los que cuenta la cadena de valor de una ESCO, se propone la ejecución individual de cada uno de los servicios dependiendo de las necesidades del cliente. De esta forma, se pueden aprovechar de forma eficiente los recursos materiales y humanos, evitando en lo posible el “stand by” de estos.

Este esquema técnico permite a la ESCO ser una opción más integradora para los clientes potenciales, igualmente permite ampliar el segmento de mercado potencial. Como ejemplo ilustrativo tenemos lo siguiente: Una empresa que manufactura cuerdas de plástico requiere energía térmica para la fundir el polímero que utiliza para la elaboración de las cuerdas, parte de esta energía puede ser suplida por la implementación de un proyecto de energía solar directa por parte de una ESCO. Una vez implementado el proyecto la ESCO, como parte de su cadena de valor, realizará visitas frecuentes para el monitoreo o mantenimiento del sistema. Durante estas visitas puede prestar servicios adicionales de mantenimiento para otros sistemas de la empresa (bombas, motores, calderas, tratamiento de agua, etc.). Otro servicio adicional pudiera ser una auditoria general de la empresa, con el fin de ofrecer una solución integral a los problemas de la empresa y garantizar la satisfacción del cliente.

g) Mecanismos de colaboración

En sí las ESCO pueden considerarse mecanismo de colaboración que involucran ecosistemas de negocios con el fin de aprovechar la creación de

mayor valor que no estaría disponible para cada empresa individualmente. Es decir, una empresa puede ser más rentable al adquirir los servicios de una ESCO. Los mecanismos de colaboración son vehículos que permiten nuevos e innovadores modelos de negocio, añadiendo elementos que antes no eran partes principales de los modelos de negocio de las empresas. Las ESCO deben de propiciar mecanismos de colaboración adicionales más allá de su propio planteamiento de origen con el fin de crear mayor valor que incluya no solo un valor económico sino también un potencial ambiental y social. Tal enfoque puede producir en el desarrollo de modelos de negocio sostenibles.

A modo de ejemplo de los mecanismos de colaboración tenemos el siguiente: Una ESCO dentro de los servicios iniciales de auditoría detecta una oportunidad de negocio para ampliar el mercado de potencial de una fábrica de tortillas de maíz. La ESCO originalmente fue requerida para disminuir el consumo de gas natural que se utiliza para calentar el agua requerida para el proceso de nixtamalización (sancocho de maíz), sin embargo, como resultado de una auditoría integral se detectó la oportunidad de elaborar tostadas aprovechando las tortillas no comercializadas y la capacidad instalada de la planta. Para ello, la ESCO realiza una propuesta adicional para la elaboración de tostadas, en la cual, la energía térmica requerida en los procesos se suministra por medio sistemas fototérmicos. De esta forma, la ESCO crea un mecanismo de colaboración en el cual se redefine el negocio de la empresa cliente, generando mayor valor para ambas partes.

Propuesta de creación de un modelo de negocio innovador de una empresa de servicios energéticos

Un primer paso

La idea central del presente trabajo es que las ESCO sirvan de medio para implementar las propuestas presentadas anteriormente, reestructurando el modelo de negocio tradicional de una ESCO, con la finalidad de potenciar el uso de energía fototérmica en la industria. Existen dos posibilidades

para implementar estas propuestas: Una de ellas es fomentar, en las ESCO ya existentes en México, el nuevo modelo de negocio y la otra es la formación de una ESCO piloto (modelo) como parte de un programa de referencia a nivel nacional. Ambas alternativas tienen diferentes mecanismos y políticas para ser implementadas con éxito, así como ventajas y desventajas. En el presente trabajo solo se presentan los mecanismos y políticas que se tienen que ejecutar para la creación de una ESCO piloto.

El gobierno tiene un papel clave que desempeñar en la creación de un entorno favorable al desarrollo de las ESCO a través de apoyo financiero, políticas de transición energética y la eliminación de barreras, así como la creación de un nuevo mercado a través de programas de demostración.

En México, con la “Ley para el aprovechamiento de energías renovables y el financiamiento de la transición energética”, y con sustento en su artículo 27 se creó el Fondo para la Transición Energética y el Aprovechamiento Sustentable de la Energía (FOTEASE), este cuenta con un comité técnico integrado por representantes de las Secretarías de Energía, de Hacienda y Crédito Público, entre otras. El propósito del Fondo es potenciar el financiamiento disponible para la transición energética, el ahorro de energía, las tecnologías limpias y el aprovechamiento de las energías renovables, el comité técnico a que se refiere este artículo, podrá acordar que con cargo al Fondo se utilicen recursos no recuperables para el otorgamiento de garantías de crédito u otro tipo de apoyos financieros para los proyectos que cumplan con el objeto de la Estrategia.

Debido a que la pretensión de esta propuesta, en primera instancia, es la creación de una ESCO piloto que sirva de referencia a nivel nacional, más no meramente lucrativa, se debe aprovechar los mecanismos de financiamiento como el FOTEASE para su creación. Entonces el primer paso es gestionar el financiamiento necesario para la estructura de una ESCO que además de los esquemas tradicionales, incluya los esquemas propuestos en este trabajo. Este financiamiento debe ser de transición para facilitar el desarrollo de la capacidad de financiamiento comercial.

Una de las piezas claves para la reestructuración del modelo de negocio de la ESCO piloto, es el capital humano con el que contará. Para ello se propone conformar un equipo de trabajo multidisciplinario y especializado. El requerimiento de personal puede ser paulatino y secuencial, con el

fin de hacer eficiente los recursos económicos. En primera instancia se requiere de un líder de proyecto, un jefe de mercadotecnia (experto en la exploración de mercados), un ingeniero de proyectos, un experto en finanzas (con experiencia en contratos) y un *staff*.

Con este equipo inicial de trabajo se puede ir reclutando más personal de acuerdo con un cronograma de trabajo y capacitación en todas las áreas. Cabe resaltar que la mayoría de los puestos que se requieren en la ESCO son de alto valor agregado. Por lo tanto, se estima que después de seis meses de puesta en operación los costos asociados exclusivamente a nómina sean alrededor de 120 000 pesos mexicanos.

Los mecanismos de política no tienen que ser estrictamente financieros. La legislación, los reglamentos que modifican las prácticas de contratación pública, la información / educación sobre la EE, ER, y los contratos de rendimiento son complementos importantes de los incentivos financieros y económicos. Por lo tanto, para acelerar la factibilidad de la ESCO piloto es necesario que a la par se trabaje respecto a estos otros temas en conjunto con las entidades correspondientes. Por ejemplo, una posible regulación para el futuro consiste en exigir una evaluación de tecnologías de sistemas fototérmicos en proceso de auditorías energéticas. En cuanto a los programas de educación las agencias de energía pueden desempeñar un papel clave en la promoción de la actividad ESCO. Pueden servir como fuentes centrales de información y la coordinación de la política de eficiencia energética y empresas de servicios energéticos. Pueden ser fundamentales para el apoyo a otros funcionarios públicos en los proyectos de demostración de ESCO y otras actividades de promoción de ESCO.

Políticas y mecanismo para la ejecución de la propuesta

a) Incentivos extras mediante la venta de CRE-Economía de escala

Las políticas y los mecanismos para la venta de certificados de reducción de emisiones ya están desarrollados y, por lo tanto, solo es necesario apearse a las reglas de operación. Con base en el artículo 95 de la “Ley

General de Cambio Climático”, en México los interesados en participar de manera voluntaria en el comercio de emisiones podrán llevar a cabo operaciones y transacciones que se vinculen con el comercio de emisiones de otros países, o que puedan ser utilizadas en mercados de carbono internacionales en los términos previstos por las disposiciones jurídicas que resulten aplicables. Además, las nuevas reformas, de la mencionada Ley, publicadas en mayo del año 2015, detonarán un crecimiento exponencial del mercado de bonos de carbono en el país, debido a que la normatividad obliga a las empresas altamente contaminantes a reportar el volumen de emisiones de bióxido de carbono que realizan.

Existen al menos dos condiciones básicas que se deben de cubrir para poder participar en la venta de CRE, una es la elaboración de un proyecto energético que incluye auditorías y verificaciones, en este sentido, no existe inconveniente ya que las ESCO prestan este servicio como parte de su cadena de valor. La otra condición es el tamaño del proyecto, en este sentido, solo los proyectos de implementación de EE y ER en las grandes empresas quizá lograrían un proyecto que cumpla con el tamaño especificado.

Ante esta disyuntiva en la propuesta se contempla lo que se llama economía de escala. La ESCO puede armar un único proyecto para la venta de CRE con la integración de un conjunto de proyectos el mismo sector, con esto logra tener dos beneficios económicos a la vez (ganancias extras y disminución de costos). También gana experiencia técnica en mercados específicos. Una de las formas de hacer más eficiente este proceso es mediante el acercamiento con las cámaras gremiales de sectores en específicos o afines.

b) Huella ecológica

Una de las políticas que se puede realizar para motivar a obtener un sello distintivo como el que se propone es mediante incentivos fiscales. Estos incentivos fiscales pueden resultar neutros al hacer un balance de los costos ambientales y sociales que entran en juego. Otra política efectiva puede ser la oportunidad de poder acceder a programas de gobierno para el financiamiento en otros rubros diferentes al energético. Y también tener como política que los proyectos públicos que se sometán a licitación

tengan esquema de evaluación donde se contemple los sellos ecológicos. En México una de las instituciones del sector energético con experiencia en el tema de sellos ecológicos es el FIDE, un fideicomiso, sin fines de lucro, constituido el 14 de agosto de 1990, por iniciativa de la Comisión Federal de Electricidad (CFE), en apoyo al Programa de Ahorro de Energía Eléctrica; para coadyuvar en las acciones de ahorro y uso eficiente de la energía eléctrica.

El Sello FIDE es un distintivo que se otorga a productos que inciden directa o indirectamente en el ahorro de energía eléctrica. Comprar productos con Sello FIDE garantiza que son equipos o materiales de alta eficiencia energética, o de características tales que le permitan coadyuvar al ahorro de energía eléctrica. Debido a sus antecedentes de creación los sellos del FIDE se caracterizan por ser exclusivamente del ahorro de electricidad y está enfocado para el usuario final ya que este por conciencia ambiental elegirá. Sin embargo, no existe en México un sello específico para la energía térmica. Uno de los mecanismos para impulsar a las empresas a obtener sellos ecológicos relacionados con la implementación de sistemas fototérmicos es hacer conciencia en la sociedad de la importancia para la sustentabilidad. En la actualidad las tecnologías de la información y la comunicación, en específico las redes sociales y aplicaciones móviles, pueden llegar a jugar un papel clave para esta concientización. Por lo tanto, se puede gestionar recursos para la creación de una aplicación móvil que tenga como fin promover los sellos ecológicos dinámicos y cuantitativos.

c) Financiamiento flexible

Las estructuras de apoyo de financiamiento y mecanismos de financiación son vitales para el éxito de las industrias ESCO y para el desarrollo de los primeros proyectos ESCO. Para los tipos de financiamientos que se proponen es necesario la normalización de los contratos, protocolos de supervisión y verificación y mecanismos de solución de controversias. Esto puede ser a través de la gestión ante la secretaría del trabajo y otras entidades afines.

d) Financiamientos mixtos

Para este tipo de financiamiento no solo considerar a entidades financieras internacionales y bancos comerciales, sino también las asociaciones gremiales de los sectores industriales de interés. En el caso de financiamiento mixto hay que procurar que los proyectos más rentables sean financiados por los bancos nacionales, con el fin de incentivar su participación y comenzar un proceso de aprendizaje respecto al financiamiento de estos proyectos. En el caso de los proyectos menos rentables, se puede gestionar apoyos financieros internacionales, sin embargo, estos proyectos deberán tener un alto impacto social e involucrar al mayor número posible de participantes.

e) Financiamiento garantizado

Uno de los mecanismos para implementar es la creación de por parte del gobierno de un “Fondo de garantía” que respalde a las entidades financieras ante la falta del incumplimiento de los pagos acordados. Este fondo puede ser retirado una vez que vaya madurando los mercados financieros respecto a los contratos de rendimiento. Por su parte la ESCO deberá estar sujeta a la auditoría para no hacer mal manejo de los fondos, dentro de la auditoría deberá demostrar la factibilidad por el cual fue otorgado el financiamiento al cliente.

f) Diversificación de servicios y mecanismos de colaboración

Las acciones que se llevan a cabo para estas dos propuestas dentro del nuevo modelo de negocio son meramente internas ya que depende exclusivamente de las habilidades comerciales, financieras y técnicas del equipo de trabajo que se integre. Sin embargo, es muy importante hacer énfasis en la capacitación del personal y la educación continua. Otra de las acciones a considerar es la subcontratación de los servicios especializados de la cadena de valor de la ESCO. Ya que esto permite una mayor cobertura del mercado, permitiendo focalizar esfuerzos en la gestión de nuevos pro-

yectos y la administración de los ya implementados. Evidentemente esta propuesta ataca la problemática del suministro de energía sustentable, sin embargo, a la par es un detonante indirecto para la solución de otras problemáticas que padece México, como son la falta de empleo (sobre todo especializado), inseguridad y el nivel bajo de emprendimiento.

Agradecimientos

El presente capítulo se realizó gracias al apoyo del fondo FORDECYT-PRONACES, convocatoria 2021-2024 (FOP04-2021-03) del CONAHCYT en marco de los proyectos No. 315324 y No. 319195. Se contó además con apoyo del PROSNII de la Universidad de Guadalajara para su publicación.

Referencias bibliográficas

- AMENEER (2023). *Asociación Mexicana de Empresas de Eficiencia Energética*. <https://www.ameneer.org/>
- Bertoldi, P., Rezessy, S., & Vine, E. (2006). Energy Service Companies in European countries: current status and a strategy to foster their development. *Energy Policy*, 34(14), 1818-1832. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2005.01.010>
- Casadesus-Masanell, R., & Ricart, J. (2010). *From strategy to business models and ontotactics*. *Long Range Plann*, 43(2-3), 195-215. <https://doi.org/10.1016/j.lrp.2010.01.004>
- CONAHCYT (2023). *Plataforma Nacional de Energía, Ambiente y Sociedad*. <https://energia.conacyt.mx/planeas/electricidad/generacion>
- Despeisse, M., Ball, P., Evans, S., & Levers, A. (2012). Industrial ecology at factory level a conceptual model. *Journal of Clean Production*, 31, 30–39. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2012.02.027>
- García, K. (2022, April 12). Importación de gas natural llega a su mayor nivel histórico. *El Economista*. <https://www.economista.com.mx/empresas/Importacion-de-gas-natural-en-su-mayor-nivel-historico-20220412-0013.html>

- García, K. (2023, April 23). Generación eléctrica limpia retrocedió 1.8% en el 2022: IMCO. *El Economista*. <https://www.economista.com.mx/empresas/Generacion-electrica-limpia-retrocedio-1.8-en-el-2022-IMCO-20230423-0076.html>
- Gobierno de México (2022, April 22). *El precio del petróleo en su menor nivel en semana y media*. <https://www.gob.mx/shcp%7Cgacetaeconomica/articulos/el-precio-del-petroleo-en-su-menor-nivel-en-semana-y-media>
- Goldman, C. A., Hopper, N. C., & Osborn, J. G. (2005). Review of US ESCO industry market trends: an empirical analysis of project data. *Energy Policy*, 33(3), 387–405. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2003.08.008>
- IEA (2007). *Tracking Industrial Energy Efficiency and CO2 Emissions*. <http://www.iea.org/>
- IEA (2023). *World Energy Outlook 2023*. <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2023>
- IIE (2011). *Potencial de Aplicación de las Tecnologías Termosolares a Concentración para la Generación de Calor de Proceso en la Industria de Alimentos y Textil*. Instituto de Investigaciones Eléctricas, Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología
- INEGI (2023a). Instituto Nacional de Estadística y Geografía. <https://inegi.org.mx/>
- INEGI (2023b). *Producto Interno Bruto por entidad federativa (PIBE) 2022*. <https://www.inegi.org.mx/contenidos/saladeprensa/boletines/2023/PIBEF/PIBEF2022.pdf>
- IRENA, IEA, & ETSAP (2015). *Solar Heat for Industrial Processes*. In *International Renewable Energy Agency & The Energy Systems Analysis Programme*. https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2015/IRENA_ETSAP_Tech_Brief_E21_Solar_Heat_Industrial_2015.pdf
- Kalogirou, S. A. (2003). The potential of solar industrial process heat applications. *Applied Energy*, 76, 337–361. [https://doi.org/10.1016/S0306-2619\(02\)00176-9](https://doi.org/10.1016/S0306-2619(02)00176-9)
- Kutscher, C. F. (1982). *A detailed design procedure for solar industrial process heat systems: overview*. <https://www.nrel.gov/docs/legosti/old/1830.pdf>
- Larson, R. W., & West, R. E. (1996). *Implementation of solar thermal technology*. Massachusetts Institute of Technology. <https://mitpress.mit.edu/9780262517157/implementation-of-solar-thermal-technology/>

- Pätäri, S., & Sinkkonen, K. (2014). Energy Service Companies and Energy Performance Contracting: is there a need to renew the business model? Insights from a Delphi study. *Journal of Clean Production*, 66, 264–271. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2013.10.017>
- Quartux. (2023). *Consumo energético en la Industria Mexicana: Análisis y perspectivas 2023-2037*. <https://quartux.com/blog/consumo-energetico-en-la-industria-mexicana/>
- Ramaiah, R., & Shashi Shekar, K. S. (2018). Solar Thermal Energy Utilization for Medium Temperature Industrial Process Heat Applications - A Review. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 376(1), 012035. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/376/1/012035>
- Ramos, C., Ramirez, R., & Beltran, J. (2014). Potential assessment in Mexico for solar process heat applications in food and textile industries. *Energy Procedia*, 49, 1879–1884. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2014.03.199>
- REPSOL (2020). *Anuario Estadístico Energético Repsol 2023*. <https://www.repsol.com/content/dam/repsol-corporate/es/energia-e-innovacion/documentos-energia-e-innovacion/anuario-estadistico-energ%C3%A9tico-repsol-2023.pdf>
- Saini, P., Ghasemi, M., Arpagaus, C., Bless, F., Bertsch, S., & Zhang, X. (2023). Techno-economic comparative analysis of solar thermal collectors and high-temperature heat pumps for industrial steam generation. *Energy Conversion and Management*, 277, 116623. <https://doi.org/10.1016/J.ENCONMAN.2022.116623>
- Secretaría de Energía (2016, November 16). *México cumplirá con su meta del 35 % de generación eléctrica con energías limpias en 2024: Consejo Consultivo para la Transición Energética*. Gobierno de México. <https://www.gob.mx/secretaria-energia/prensa/mexico-cumplira-con-su-meta-del-35-de-generacion-electrica-con-energias-limpias-en-2024-consejo-consultivo-para-la-transicion-energetica>
- SENER (2020). *Balance Nacional de Energía 2020*. https://www.google.com/url?sa=t&source=web&rct=j&opi=89978449&url=https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/707654/BALANCE_NACIONAL_ENERGIA_0403.pdf&ved=2ahUKewiyqemouKy-GAxXLlu4BHZHTAIAQFnoECA4QAQ&usg=AOvVaw2WDbPw-VgmFR5iC_zIhVUUh

- SENER. (2021). *Demanda y consumo 2021-2035*. https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/649612/PRODESEN_CAP_TULO-4.pdf
- SENER. (2022). *Balance Nacional de Energía 2022*. <https://base.energia.gob.mx/BNE/BalanceNacionalDeEnerg%C3%ADa2022.pdf>
- Vannoni, C., Battisti, R., & Drigo, S. (2008). *Potential for solar heat in industrial processes. Task 33/VI Solar heating and cooling executive committee of the International Energy Agency*. <https://www.aee-intec.at/0uploads/dateien561.pdf>
- Vine, E. (2005). An international survey of the energy service company (ESCO) industry. *Energy Policy*, 33(5), 691–704. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2003.09.014>

Capítulo 2.4

Innovación y sostenibilidad: soluciones basadas en la naturaleza para el desarrollo urbano del Área Metropolitana de Guadalajara

Luis Enrique Barboza Niño¹
Mirna Aideé Avilés Mis²
Joshua Camarena Guzmán³
José De Jesús Cabrera Chavarría⁴

<https://doi.org/10.61728/AE24004312>



¹ Estudiante del Doctorado en Agua y Energía del Centro universitario de Tonalá de la Universidad de Guadalajara. *e-mail:* luis.barboza8351@alumnos.udg.mx

² Estudiante del Doctorado en Agua y Energía del Centro universitario de Tonalá de la Universidad de Guadalajara. *e-mail:* mirna.aviles8153@alumnos.udg.mx

³ Estudiante del Doctorado en Agua y Energía del Centro universitario de Tonalá de la Universidad de Guadalajara. *e-mail:* joshua.camarena8353@alumnos.udg.mx

⁴ Profesor investigador del Centro universitario de Tonalá de la Universidad de Guadalajara. *e-mail:* jose.cchavarría@academicos.udg.mx

Introducción

El crecimiento urbano y el aumento de la población presentan retos importantes para la sostenibilidad del medioambiente, la calidad de vida y la capacidad de adaptación al cambio climático. En este contexto, las Soluciones Basadas en la Naturaleza (SbN) han surgido como una estrategia innovadora para reimaginar el desarrollo urbano en armonía con el entorno natural. Como señalan Cohen-Shacham et al. (2016), las Soluciones basadas en la Naturaleza (SbN) se refieren a iniciativas que buscan proteger, restaurar y gestionar de manera sostenible los ecosistemas, tanto naturales como modificados.

Estas acciones están diseñadas para enfrentar desafíos sociales de manera efectiva y adaptable, al mismo tiempo que ofrecen ventajas tanto para el bienestar de las personas como para la conservación de la biodiversidad. La integración no solo responde a la urgencia de mitigar los impactos ambientales negativos, sino que también ofrece oportunidades para revitalizar áreas urbanas y aumentar la calidad de vida de los ciudadanos (Kabisch et al., 2016).

La adopción de SbN en la planificación urbana implica el reconocimiento de que los ecosistemas sanos y los espacios verdes son esenciales para el desarrollo sostenible de las ciudades. Estudios recientes han demostrado que las SbN pueden contribuir significativamente a la mitigación de los efectos del cambio climático y adaptación, la gestión de recursos hídricos, la reducción de la contaminación, el enfriamiento de las ciudades y el fomento de la cohesión social (Eggermont et al., 2015; Raymond et al., 2017). Asimismo, la implementación de SbN promueve la participación ciudadana, el sentido de pertenencia y la integración social, factores clave para el éxito a largo plazo de las intervenciones urbanas (Frantzeskaki et al., 2019).

Abordaremos la importancia de incorporar SbN en el desarrollo urbano, subrayando cómo estas soluciones no solo enfrentan eficazmente los desafíos ambientales y sociales contemporáneos, sino que también ofre-

cen un camino hacia ciudades más resilientes, saludables y equitativas. A través de un análisis de estudios de caso y literatura relevante, se examinarán las múltiples ventajas de las SbN y se discutirán las mejores prácticas y desafíos para su implementación en el contexto urbano.

La creciente urbanización plantea desafíos sin precedentes para el Área Metropolitana de Guadalajara (AMG), donde el rápido crecimiento de la población y la expansión urbana ejercen una presión considerable sobre los recursos naturales y la calidad de vida. En este contexto, la adopción de Soluciones Basadas en la Naturaleza (SbN) se presenta como una estrategia vital para promover la innovación y la sostenibilidad en el desarrollo urbano. Este enfoque no solo aborda los retos medioambientales y socioeconómicos actuales, sino que también ofrece un camino resiliente hacia el futuro.

Soluciones basadas en la naturaleza (SbN)

Las Soluciones Basadas en la Naturaleza (SbN) son estrategias de gestión ambiental que buscan aprovechar los procesos naturales para abordar diversos desafíos sociales, económicos y ambientales. Este enfoque se centra en la protección, gestión sostenible y restauración de ecosistemas naturales o modificados, con el objetivo de lograr beneficios tanto para el bienestar humano como para la biodiversidad.

Las SbN pueden ser aplicadas en una variedad de contextos, incluyendo áreas urbanas, rurales y de paisajes naturales, y abordan desafíos tales como el cambio climático, la seguridad hídrica, la seguridad alimentaria, la reducción del riesgo de desastres, y la salud pública, entre otros. Estas soluciones ofrecen un enfoque holístico que no solo busca mitigar los efectos negativos de la actividad humana en el medioambiente, sino también potenciar los servicios ecosistémicos que benefician a las sociedades de maneras sostenibles y rentables. Algunos ejemplos de SbN incluyen:

- a) Restauración de humedales, para mejorar la calidad del agua y proporcionar protección contra inundaciones.
- b) Creación y conservación de áreas verdes urbanas, como parques y jardines, que pueden ayudar a enfriar las ciudades, mejorar la calidad del aire y ofrecer espacios recreativos para los residentes, estas acciones permitirán actuar como islas de frescura ante el incremento de temperatura en las zonas urbanas.

- c) Agricultura regenerativa y agroforestería, que integran prácticas agrícolas con la conservación de la biodiversidad y la gestión sostenible de los recursos naturales.
- d) Reforestación y aforestación, para capturar carbono, mejorar la calidad del aire y del suelo, y proporcionar hábitats para la fauna.
- e) Techos y muros verdes en entornos urbanos, para mejorar el aislamiento térmico de los edificios, reducir el efecto de isla de calor urbano y promover la biodiversidad.

Las SbN se destacan por su capacidad de proporcionar múltiples beneficios ecológicos, económicos y sociales simultáneamente, promoviendo un enfoque más integrado y sostenible para el desarrollo y la gestión ambiental.

Beneficios de las SbN para el desarrollo sostenible del AMG

Las Soluciones Basadas en la Naturaleza (SbN) ofrecen un enfoque innovador y sostenible para abordar los retos de desarrollo urbano en el Área Metropolitana de Guadalajara (AMG), promoviendo la resiliencia, el bienestar de la población y la conservación del medioambiente. Los beneficios de implementar SbN en el AMG son múltiples y diversos, extendiéndose a través de aspectos sociales, económicos y ambientales.

a) Beneficios ambientales

Mitigación y adaptación al cambio climático: las SbN juegan un rol crucial en la captura de carbono y la reducción de la huella de carbono de las ciudades. La reforestación urbana y periurbana, y la creación de parques y espacios verdes, pueden contribuir significativamente a la mitigación del cambio climático (Escobedo, Kroeger y Wagner, 2011). Además, estas áreas verdes urbanas ofrecen servicios de regulación climática, reduciendo el efecto de isla de calor y mejorando el confort térmico en zonas densamente pobladas (Gómez-Baggethun et al., 2013).

Conservación de la biodiversidad: al integrar elementos naturales en el paisaje urbano, se promueve la conservación de la biodiversidad local y se proporcionan hábitats para diversas especies. Las áreas verdes urbanas

actúan como corredores ecológicos que facilitan la movilidad de especies y contribuyen a la conservación de la biodiversidad (Dearborn y Kark, 2010).

b) Beneficios sociales

Salud y bienestar: las áreas verdes y otros elementos de SbN en entornos urbanos han demostrado mejorar la salud física y mental de los residentes, ofreciendo espacios para la recreación, el ejercicio y el contacto con la naturaleza (Hartig, Mitchell, de Vries y Frumkin, 2014). Estos espacios también fomentan la cohesión social y el sentido de pertenencia entre los miembros de la comunidad (Kuo, 2015).

Reducción del riesgo de desastres: las SbN, como la restauración de humedales y la gestión sostenible de cuencas hidrográficas, juegan un papel vital en la prevención de inundaciones y la reducción del riesgo de desastres naturales, protegiendo a las comunidades vulnerables (Tzoulas et al., 2007).

c) Beneficios económicos

Eficiencia económica: implementar SbN puede ser más costo-efectivo a largo plazo en comparación con las soluciones de infraestructura gris convencionales, especialmente en términos de mantenimiento y operación (Geneletti et al., 2020). Las SbN pueden fomentar el aumento de la plusvalía de las propiedades, así como la atracción de inversiones, esto sin duda podrá generar una mayor calidad de vida de las personas que habitan las zonas aledañas.

Creación de empleo: las actividades de restauración ecológica, manejo de áreas verdes y agricultura urbana generan empleos verdes y promueven el emprendimiento en sectores relacionados con el medioambiente y la sostenibilidad (Kremen Miles, 2012).

La implementación de Soluciones Basadas en la Naturaleza en el AMG ofrece una oportunidad única para enfrentar los desafíos del desarrollo urbano de manera integrada, promoviendo la sostenibilidad, la resiliencia y el bienestar de las comunidades. Al priorizar las SbN, el AMG puede lide-

rar un modelo de desarrollo urbano que equilibre las necesidades humanas con la conservación del patrimonio natural.

El río Cheonggyecheon: un caso de éxito

A nivel global, uno de los proyectos de implementación de SbN es el proyecto de recuperación del río Cheonggyecheon en Seúl, Corea del Sur, es un destacado ejemplo de renovación urbana y restauración ecológica, este era un arroyo natural de 13.7 kilómetros de longitud con un ancho variable entre los 20 y 85 m. Iniciado en 2003 y completado en 2005, este proyecto transformó una autopista elevada y un río entubado en un parque lineal público, revitalizando el área urbana y restaurando un hábitat natural.

Durante la industrialización acelerada de Corea del Sur en 1958, el río Cheonggyecheon fue cubierto con concreto y posteriormente sobrepasado por una autopista elevada debido a preocupaciones de tráfico y desarrollo urbano (Figura 1).

Figura 1

Antes y después de la intervención del río/arroyo Cheonggyecheon



Fuente: obras.expansion.mx, 2018.

Décadas más tarde, el proyecto de restauración, liderado por el entonces alcalde de Seúl, Lee Myung-bak, buscó revertir estos cambios ambientales y sociales negativos, ya que la autopista construida sobre lo que era el río,

también fungía como una cicatriz urbana que dividía a la ciudad. El proceso de recuperación comenzó en julio de 2003 y requirió dismantelar 5.6 kilómetros de autopista, una tarea monumental que enfrentó considerable oposición inicial por parte de comerciantes locales y preocupaciones sobre el tráfico. Sin embargo, con el compromiso político y un amplio apoyo público, el proyecto avanzó. Para octubre de 2005, el Cheonggyecheon había sido transformado en un espacio verde que cruzaba el centro de Seúl, con senderos peatonales, cascadas artificiales y más de 22 puentes restaurados o nuevos (Figura 2).

Figura 2

Escenario actual del río/arroyo Cheonggyecheon



Fuente: elaboración propia, 2024.

Este proyecto ha tenido múltiples beneficios, ambientales, económicos, sociales y turísticos. Tales como:

- a) Aumento de la calidad del aire: La eliminación del viaducto y la adición de flora en el área han reducido significativamente los niveles de polvo y contaminantes como el monóxido de carbono y el dióxido de nitrógeno en sus alrededores.
- b) Reducción del efecto de isla de calor: La presencia del agua y la vegetación ha reducido las temperaturas locales, mitigando el efecto de isla de calor urbano. En la siguiente imagen se muestra la variación de temperatura en una calle cercana y en la avenida de la restauración en el año de su inauguración (Figura 3).

Sequía e islas de calor en el AMG

Las islas de calor urbano (ICU) representan un fenómeno donde las áreas urbanas experimentan temperaturas más elevadas que sus alrededores rurales. Este artículo revisa las causas, impactos y estrategias de mitigación de las ICU, enfatizando la importancia de una planificación urbana consciente y sostenible. A través de la síntesis de estudios recientes, se destaca la relevancia de las ICU en el contexto del cambio climático y la calidad de vida urbana.

El fenómeno de las islas de calor urbano ha cobrado importancia en las últimas décadas, dada su influencia en el aumento de las temperaturas urbanas, el consumo de energía y la salud pública. Las ICU se caracterizan por la diferencia de temperatura entre las zonas urbanas densamente construidas y las áreas rurales circundantes, generando un “microclima” urbano más cálido (Stone Jr., 2005).

a) Causas de las ICU

Las principales causas de las ICU incluyen la alteración de la superficie terrestre por materiales de construcción que absorben y retienen calor, la escasa vegetación, y las emisiones de calor antropogénicas derivadas de vehículos y edificaciones (Rizwan, Dennis y Liu, 2008). Estos factores conducen a una acumulación de calor en el ambiente urbano, exacerbada por la reducción de la evaporación y la transpiración debido a la limitada presencia de áreas verdes.

Impactos de las ICU

Las ICU tienen múltiples impactos en el ambiente urbano y la salud humana. Elevan la demanda de energía para refrigeración, incrementan las emisiones de contaminantes y gases de efecto invernadero, y pueden provocar un aumento en la incidencia de enfermedades relacionadas con el calor (Akbari, Pomerantz y Taha, 2001). Además, afectan negativamente a la calidad del aire y reducen la calidad de vida en las ciudades.

b) Estrategias de mitigación

La mitigación de las ICU puede lograrse a través de varias estrategias, incluyendo el incremento de la cobertura vegetal mediante la plantación de árboles y la creación de parques urbanos, el uso de materiales de construcción reflectantes o de colores claros, y el desarrollo de techos verdes y azoteas blancas (Santamouris, 2014). Estas estrategias no solo reducen la temperatura urbana, sino que también promueven la biodiversidad y mejoran la calidad del aire.

La implementación efectiva de medidas de mitigación requiere un enfoque integrado que incluya la planificación urbana, las políticas públicas y la participación comunitaria. Es crucial fomentar la investigación y el desarrollo de nuevos materiales de construcción sostenibles y tecnologías innovadoras que contribuyan a la reducción de las ICU (Tan, Zheng, Tang, Guo y Li, 2010).

Las ICU representan un desafío significativo para la sostenibilidad urbana, destacando la necesidad de enfoques integrados en la planificación y gestión de las ciudades. A través de la adopción de estrategias de mitigación y la promoción de la conciencia sobre este fenómeno, es posible crear entornos urbanos más frescos, saludables y sostenibles.

El AMG, siendo una de las zonas urbanas más grandes de México, ha experimentado un crecimiento urbano significativo, que ha traído consigo una serie de desafíos ambientales. Entre estos, la sequía y las islas de calor urbanas representan dos de los problemas más severos. En la última década, la región ha enfrentado períodos de sequía intensos, coincidiendo con un aumento en la temperatura media, particularmente en zonas densamente urbanizadas.

Durante los años de sequía, especialmente los años 2018 y 2021, las temperaturas fueron consistentemente más altas en comparación con las áreas suburbanas y rurales del AMG. Estas condiciones de isla de calor se correlacionaron con una reducción en la precipitación de hasta un 20 % en comparación con el promedio histórico. La expansión urbana ha llevado a un aumento en las superficies impermeables y una disminución en las áreas verdes, exacerbando los efectos de la sequía y creando condiciones más cálidas en el centro de Guadalajara y sus alrededores. La vegetación

juega un papel crucial en la regulación térmica y la retención de humedad, por lo tanto, su reducción puede haber contribuido a una mayor severidad en los eventos de sequía observados.

Los pronósticos de los aumentos de temperatura no son alentadores, sin embargo, es de suma importancia que el desarrollo urbano implemente estrategias basadas en SbN que permitan mitigar los efectos del cambio climático, las ICU para mantener el AMG con un nivel adecuado de desarrollo sin poner en riesgo la calidad de vida de sus habitantes.

Conclusiones

El desarrollo urbano contemporáneo enfrenta desafíos multifacéticos, entre los que destacan la presión sobre los recursos naturales y la necesidad de adaptación al cambio climático. En este contexto, el artículo ha destacado el rol crucial de las Soluciones Basadas en la Naturaleza (SbN) como estrategias efectivas para fomentar un desarrollo urbano más resiliente y sostenible. Las SbN no solo ofrecen un medio para contrarrestar los efectos adversos de la expansión urbana, como las islas de calor y la sequía, sino que también potencian los servicios ecosistémicos que benefician a la biodiversidad y a la sociedad.

La implementación de estas soluciones en el Área Metropolitana de Guadalajara ha demostrado ser una vía prometedora hacia la sustentabilidad urbana, alineando el crecimiento de la ciudad con la conservación ambiental. Las estrategias como la reforestación urbana, la creación de espacios verdes, y las prácticas de agricultura regenerativa no solo han mejorado la calidad del aire y reducido las temperaturas urbanas, sino que también han fortalecido la cohesión social y económica mediante la creación de espacios para la recreación y el encuentro comunitario.

El caso del río Cheonggyecheon en Seúl ilustra el impacto transformador de las SbN a escala global, mostrando cómo la rehabilitación de espacios urbanos puede revivir un área mientras se devuelven servicios ecosistémicos críticos a la ciudad. Este ejemplo subraya la viabilidad de replicar iniciativas similares en otras metrópolis del mundo, adaptándolas a las condiciones locales específicas.

Finalmente, mientras las ciudades continúan expandiéndose, la integración de las SbN en la planificación urbana emerge como un enfoque indis-

pensable para asegurar que el desarrollo urbano sea sostenible y capaz de enfrentar los desafíos del siglo XXI. El futuro de las áreas urbanas dependerá significativamente de nuestra capacidad para implementar y escalar estas soluciones, promoviendo un equilibrio entre el crecimiento humano y la preservación del medioambiente. Esto requiere un compromiso colectivo hacia políticas innovadoras y una participación activa de todos los sectores de la sociedad para redefinir el paisaje urbano en armonía con la naturaleza.

Referencias bibliográficas

- Akbari, H., Pomerantz, M., & Taha, H. (2001). Cool surfaces and shade trees to reduce energy use and improve air quality in urban areas. *Solar Energy*, 70(3), 295-310. [https://doi.org/10.1016/S0038-092X\(00\)00089-X](https://doi.org/10.1016/S0038-092X(00)00089-X)
- Arroyo Cheonggyecheon. *Visit Korea*. Tomado de <https://spanish.visitkorea.or.kr/svc/whereToGo/locIntrdn/locIntrdnList.do?vcontsId=72458&menuSn=351>
- Bolund, P., & Hunhammar, S. (1999). Ecosystem services in urban areas. *Ecological Economics*, 29(2), 293-301. [https://doi.org/10.1016/S0921-8009\(99\)00013-0](https://doi.org/10.1016/S0921-8009(99)00013-0)
- Cheonggyecheon Restoration Project. A revolution in Seoul. In *Keun Lee*. Seoul Metropolitan Government. <https://www.seoulsolution.kr>
- Cheonggyecheon Stream Restoration Project. *Landscape Performance Series*. Recuperado de: <https://www.landscapeperformance.org/case-study-briefs/cheonggyecheon-stream-restoration-project>
- Cho, M. H. (2010). The Cheonggyecheon Restoration Project: A revolution in Seoul. *Architectural Institute of Korea*, 32(2), 145-165. https://www.researchgate.net/publication/275991464_The_politics_of_urban_nature_restoration_The_case_of_Cheonggyecheon_restoration_in_Seoul_Korea
- Cohen-Shacham, E., Walters, G., Janzen, C., & Maginnis, S. (2016). *Nature-based solutions to address global societal challenges*. IUCN. <https://doi.org/10.2305/IUCN.CH.2016.13.en>
- Dearborn, D. C., & Kark, S. (2010). Motivations for conserving urban biodiversity. *Conservation Biology*, 24(2), 432-440. <https://doi.org/10.1111/j.1523-1739.2009.01328.x>

- Eggermont, H., Balian, E., Azevedo, J. M. N., Beumer, V., Brodin, T., Claudet, J., & Le Roux, X. (2015). Nature-based solutions: New influence for environmental management and research in Europe. *GAIA - Ecological Perspectives for Science and Society*, 24(4), 243-248. <https://doi.org/10.14512/gaia.24.4.9>
- Escobedo, F.J., Kroeger, T. and Wagner, J.E. (2011) Urban Forests and Pollution Mitigation: Analyzing Ecosystem Services and Disservices. *Environmental Pollution*, 159, 2078-2087. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2011.01.010>
- Frantzeskaki, N., McPhearson, T., Collier, M.J., Kendal, D., Bulkeley, H., Dumitru, A., & Nagendra, H. (2019). Nature-based solutions for urban climate change adaptation: Linking science, policy, and practice communities for evidence-based decision-making. *BioScience*, 69(6), 455-466. <https://doi.org/10.1093/biosci/biz042>
- Gómez, F., Barradas, V. L., & Huante, P. (2018). Efectos de la isla de calor urbana en la vegetación: Implicaciones para el diseño de espacios verdes en ciudades. *CienciaUAT*, 12(2), 58-70. <https://doi.org/10.29059/cienciauat.v12i2.932>
- Hernández, J. L., & García, E. V. (2015). *Cambio climático y su impacto en las áreas urbanas: El caso del AMG*. Universidad de Guadalajara.
- Kabisch, N., Stadler, J., Korn, H., & Bonn, A. (2016). Nature-based solutions to climate change mitigation and adaptation in urban areas: Perspectives on indicators, knowledge gaps, barriers, and opportunities for action. *Ecology and Society*, 21(2). <https://doi.org/10.5751/ES-08373-210239>
- Kim, G. (2015). Effects of the Cheonggyecheon Restoration Project on the local microclimate and regional air quality. *Journal of Environmental Sciences*, 34(2), 205-214. https://www.researchgate.net/publication/282475080_The_Effect_of_the_Cheonggyecheon_Restoration_Project_on_the_Mitigation_of_Urban_Heat_Island
- Lee, Y. (2010). Public space and environmental improvement through the Cheonggyecheon restoration. *Landscape and Urban Planning*, 97(4), 284-296.
- Martínez, A., & López, R. (2019). Efectos de la urbanización en el clima local de Guadalajara. *Geografía y Sistemas de Información Geográfica*, 42(2), 134-153.

- Oke, T. R. (1982). The energetic basis of the urban heat island. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 108(455), 1-24. <https://doi.org/10.1002/qj.49710845502>
- Pérez, I. S., & Torres, M. N. (2021). Impacto de las islas de calor en la severidad de la sequía en áreas metropolitanas. *Journal of Environmental Management*, 276, 111182.
- Raymond, C. M., Frantzeskaki, N., Kabisch, N., Berry, P., Breil, M., Nita, M. R., & Calfapietra, C. (2017). A framework for assessing and implementing the co-benefits of nature-based solutions in urban areas. *Environmental Science & Policy*, 77, 15-24. <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2017.07.008>
- Rizwan, A. M., Dennis, L. Y., & Liu, C. (2008). A review on the generation, determination and mitigation of Urban Heat Island. *Journal of Environmental Sciences*, 20(1), 120-128. <https://doi.org/10.1016/S1001-074>
- Santamouris, M. (2014). Cooling the cities – A review of reflective and green roof mitigation technologies to fight heat island and improve comfort in urban environments. *Solar Energy*, 103, 682-703. <https://doi.org/10.1016/j>

Capítulo 2.5

Degradación de suelos en Colombia y soluciones de bioingeniería: perspectivas transversales de recuperación a largo plazo

*Juan Camilo Pineda Herrera¹
Jorge Arturo Pineda Jaimes²
Sherley Catheryne Larrañaga-Rubio³*

<https://doi.org/10.61728/AE24004329>



¹ Profesor de la Pontificia Universidad Javeriana, Bogotá, Colombia. *e-mail:* pineda_j@javeriana.edu.co

² Profesor de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Bogotá, Colombia. *e-mail:* japinedaj@udistrital.edu.co

³ Integrante de DICEÍN S.A.S, Ingenieros Consultores, Bogotá, Colombia *e-mail:* sclaranagar@diceinsas.com

Introducción

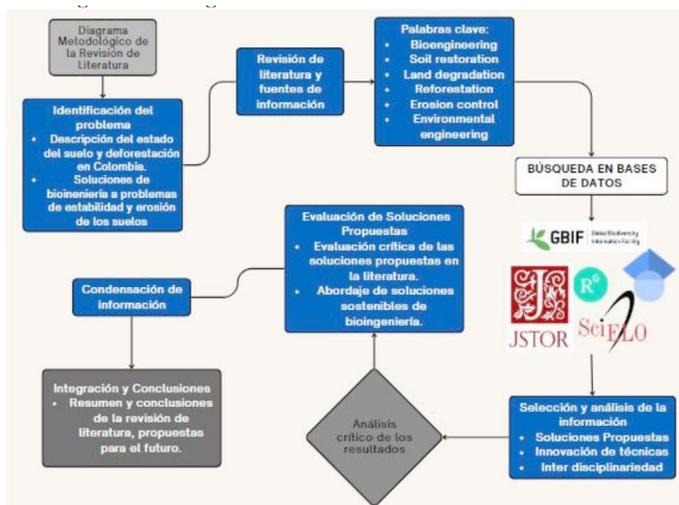
Procesos erosivos profundos en Suelos Colombia

La degradación de la cobertura del suelo en Colombia por fenómenos erosivos profundos debido a la deforestación, la minería ilegal, y la expansión agrícola y ganadera genera un cambio acelerado del uso del suelo que tiene consecuencias negativas en la sostenibilidad del territorio, la conservación de la biodiversidad y la mitigación de los efectos del cambio climático. Causando una significativa degradación de los ecosistemas, pérdida de biodiversidad, y alteraciones en los ciclos hidrológicos, aumentando la vulnerabilidad a desastres naturales como deslizamientos e inundaciones.

Con la finalidad de llevar a cabo procesos de recuperación ecológica de zonas deterioradas, surgen las estrategias de bioingeniería como soluciones innovadoras y transversales. Estas estrategias incluyen el uso de biomantos, estructuras de trincho, y el terraceo con plantas nativas, que siendo métodos económicos y funcionales contribuyen a la estabilización de taludes y la restauración de la vegetación para controlar la erosión.

Se presenta una revisión general de estrategias enfocadas a la recuperación ecológica de suelos. En el contexto de esta investigación sobre la intersección entre la biología y la ingeniería, representada a través de la bioingeniería en relación con la deforestación y los procesos de erosión en Colombia, se presenta a continuación un diagrama metodológico que ilustra el proceso de revisión de literatura llevado a cabo, en la figura 1 el diagrama desglosa las etapas fundamentales de la investigación.

Figura 1
Estructura metodológica de la investigación



Fuente: Elaboración propia, 2024.

Colombia, siendo un país megadiverso enfrenta un acelerado cambio en el uso de su suelo, con consecuencias significativas para el medioambiente y la sociedad. Esto genera una serie de problemas ambientales que ponen en riesgo la sostenibilidad del país, donde la tasa de deforestación ha aumentado en los últimos años, principalmente por fenómenos socioeconómicos como la minería ilegal, expansión de terrenos destinados a la agricultura y pastizales para la ganadería, fenómenos impulsados frecuentemente por grupos armados ilegales. Esta pérdida de cobertura forestal y cambio de uso del suelo tiene graves consecuencias, entre las que se encuentra la pérdida de biodiversidad, la captura de carbono y la alteración del ciclo hidrológico (IGAC, 2022).

Según el Ministerio de Ambiente de Colombia (Minambiente, 2024): “La deforestación se redujo en 36 % en 2023, pasando de 123.517 ha deforestadas en 2022 a 79.256 ha en el año anterior”. Sin embargo, también advirtió sobre una preocupante tendencia ascendente de la deforestación en lo que va a julio de 2024, según reportes, esta situación se debe a la intensificación de actividades ilegales por parte de grupos armados y al impacto del fenómeno de El Niño.

En el último trimestre de 2023, los departamentos del Meta, Guaviare y Caquetá, localizados en la Amazonía Colombiana (Figura 2) concentraron la mayor parte de esta pérdida, con un total de 18.400 ha, impulsada por la expansión de la frontera agropecuaria y la tala ilegal, junto con la colonización dirigida y la llegada de personas externas impulsadas por grupos armados ilegales. Esta situación no solo reduce la capacidad de los ecosistemas de absorber carbono, sino que también fragmenta hábitats y amenaza la supervivencia de numerosas especies, afectando dinámicas ecosistémicas y propiciando la pérdida de biodiversidad en las áreas afectadas (Minambiente, 2024).

Figura 2

Mapa de Colombia con límites de la Amazonia Colombiana (rojo), y los departamentos que concentran la mayor pérdida de coberturas vegetales por deforestación



Fuente: Elaboración propia, 2024.

Esta transformación acelerada de los paisajes colombianos impulsada por la deforestación y la minería causa consecuencias devastadoras para los ecosistemas, entre las que se encuentran la pérdida de cobertura vegetal y la fragmentación de hábitats alteran los ciclos hidrológicos, erosionando

los suelos y aumentando la vulnerabilidad de los mismos a eventos extremos como deslizamientos e inundaciones (García-García y Díaz-Timoté, 2022).

Junto con los fenómenos ya conocidos, se estima que cerca del 40 % del territorio colombiano está afectado por la erosión y pérdida de suelo orgánico, lo que equivale a aproximadamente 45 millones de hectáreas. Como se mencionó previamente, las regiones más afectadas incluyen los departamentos de Meta, Caquetá y Guaviare, donde la deforestación para la expansión ganadera y la tala ilegal han acelerado la pérdida de suelo y su capa orgánica (IGAC, 2022).

En la gran escala, la capa de suelo orgánico desempeña un papel crucial en la regulación del clima y los procesos de captura de carbono, al perderse, se reduce la capacidad del suelo para actuar como sumidero de carbono, lo que genera alteraciones climáticas y contribuye al aumento de las concentraciones de CO₂ en la atmósfera, impulsando el calentamiento global. La implementación de prácticas agrícolas sostenibles y la restauración de ecosistemas degradados son medidas esenciales para incrementar los niveles de materia orgánica en el suelo y mitigar los efectos del cambio climático (Lal, 2003; Smith, 2008).

Así, el cambio de uso del suelo en Colombia ha inducido una serie de procesos degradativos, entre los que destacan fuertes procesos erosivos del suelo, donde la pérdida de la cubierta vegetal expone el suelo a la acción de los agentes erosivos, favoreciendo el arrastre de partículas y la pérdida de la capa superficial fértil. En casos de actividades extractivas, la contaminación por metales pesados agrava la situación, reduciendo la calidad del suelo y limitando gravemente su capacidad de recuperación. Tanto la erosión hídrica como la erosión eólica se intensifican en áreas deforestadas, acelerando la degradación de los suelos y la pérdida de nutrientes (Minambiente, 2015; Sklenicka et al., 2020).

Ante la gravedad de estas situaciones, existen métodos desarrollados y preestablecidos por la biología y la ecología para iniciar procesos de restauración ecológica, realizando principalmente procesos de revegetación con especies nativas o mantenimiento de áreas revegetadas según el caso, dichas acciones pueden ser enmarcadas en conceptos de restauración, rehabilitación o recuperación, tal como se explican en la tabla 1, según la si-

tuación y las posibilidades reales de llevar el ecosistema a un estado similar al estado inicial, o completamente diferente, pero funcional (hablando en términos de servicios ecosistémicos), (Minambiente, 2015).

Tabla 1
Intervención ecológica según el objetivo

Procedimiento	Objetivos para el ecosistema
Restauración ecológica	Partir de un área degradada, destruida o dañada para iniciar un proceso de restablecimiento, busca recuperar su estructura, composición y función.
Rehabilitación ecológica	Restablecer atributos funcionales o estructurales, junto con la recuperación de servicios ecosistémicos en general
Recuperación ecológica	Retomar la utilidad del ecosistema degradado para la prestación de servicios ambientales que pueden ser diferentes a los servicios del ecosistema Original, siendo integrado y paisajísticamente a su entorno. ecológica

Fuente: Adaptado de Vargas et al., 2007.

Perspectivas para la recuperación ecológica de zonas deterioradas a partir de soluciones de bioingeniería

Siendo conscientes del impacto que han tenido los cambios de uso del suelo y las profundas afectaciones de las actividades antrópicas en el ambiente, la biología y la ingeniería han desarrollado un punto de intersección que propone de forma innovadora y transversal un nuevo curso de acción para aportar soluciones a dichos problemas: la bioingeniería, cuyos desarrollos para la estabilización de taludes inclinados por medio de biomantos y estructuras tipo trincho (ver figura 4) junto con el uso de plantas para procesos de revegetación, con el uso en conjunto de enmiendas orgánicas han desembocado en nuevas soluciones para la recuperación de ecosistemas afectados por efectos antrópicos y procesos erosivos.

La bioingeniería busca aprovechar los procesos naturales y materiales biológicos para apoyar el proceso restauración ecológica que, según el SER (Society for Ecological Restoration) es la acción de asistir el proceso de recuperación de un ecosistema que ha sido degradado, dañado o destruido para llegar a un estado de mejora que bien puede ser similar al anterior y prestar servicios ecosistémicos siendo autosostenible, o retomando la utilidad de un ecosistema, llegando a obtener la prestación de servicios ecosistémicos diferentes a los del ecosistema original, pero adaptado en el paisaje (SER, 2004). Así, a bioingeniería establece una sinergia entre los procesos naturales y materiales biológicos junto con métodos y herramientas propias de la ingeniería para diseñar, construir y operar sistemas para estabilizar suelos, controlar la erosión y restaurar la vegetación en áreas afectadas (Schiechtel, 1980).

Entre las soluciones desarrolladas por la bioingeniería para la recuperación del suelo y zonas afectadas por erosión e inestabilidad se encuentran: la restauración de la cubierta vegetal y estabilización de terreno por medio del uso de técnicas y materiales biodegradables según la necesidad, sea esta dictada por la afectación como en los casos de estabilización de taludes, zonas con deslizamiento, o pérdida de la cobertura vegetal, atacando procesos erosivos por socavación, desprendimiento, erosión fluvial, laminar y lineal (Li y Eddleman, 2002).

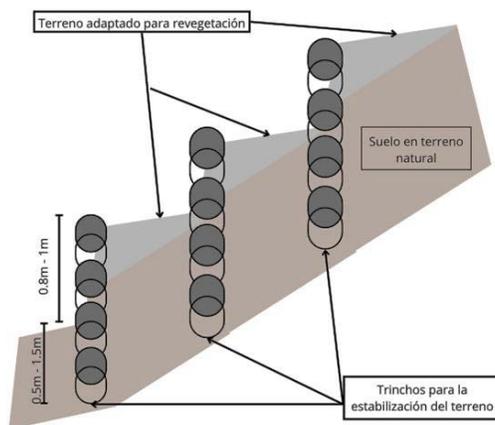
Son múltiples los casos en los que ha sido imperativa la articulación de los conceptos previamente mencionados y manejados por la restauración ecológica, que, junto con procesos geotécnicos como lo son el cálculo de coeficientes de cohesión y análisis de estabilidad para los suelos han proporcionado una visión holística y más completa de los fenómenos erosivos hídricos o gravitatorios (ya sea por socavación o desprendimiento), en casos donde en zonas de afluencia de agua se ve afectada la profundidad y estabilidad del suelo se desarrollan problemas de inestabilidad, afectando la variación de los niveles de los ríos, cambios en la velocidad del cauce y por consiguiente cambios en la capacidad de transporte de sedimentos que tiene el cauce en estado de equilibrio, igualmente visto en casos donde por fenómenos gravitatorios en ambientes terrestres se desarrollan profundos problemas de inestabilidad en el suelo (Peláez y Correa, 2004).

Para el manejo transversal a este tipo de procesos erosivos se ha dado el desarrollo y aplicación estribos o fajinas vivas (Rojas, Castro, y Basto,

2015), basados en los principios de disipación de la energía y equilibrio en la retención de sedimentos mientras se estabilizan los suelos superficiales por medio de la integración de ramificaciones en la superficie del terreno, reforzando las capas de suelo y logrando así una retención y eventual recuperación en el mismo (Benitez Moreno y Sarmiento Colmenares, 2014).

De la misma forma, en los casos donde los fenómenos erosivos se dan en taludes con alto grado de inclinación, y suponen un riesgo de estabilidad al punto de generar movimientos en masa por su forma abrupta, se opta como solución integral el establecimiento de terracedo con trinchos (ver figura 4), modificando la pendiente con una serie de taludes en escalera como se muestra en la figura 3, donde integrando tratamientos de vegetación y realizando un manejo óptimo de aguas superficiales por medio del remodelado del terreno y la incorporación de material vegetal herbáceo y arbustivo, siendo la primera defensa contra la erosión en el suelo, afianzando y aprovechando el crecimiento rápido y las ramificaciones extensas y profundas del sistema radicular de las mismas terreno (Yabar Delgado, 2021). Ahora bien, existen múltiples casos en los que se puede integrar el uso de trinchos y biomantos para estabilizar el terreno (figura 3).

Figura 3
Diagrama de trinchos en escalera para recuperación ecológica de taludes



Fuente: Elaboración propia, 2024.

En los casos donde no existe un grado de inclinación abrupto, y por consiguiente no existe un peligro latente de deslizamiento, es posible optar por el uso de biomantos, los cuales surgen como una solución menos intrusiva en el proceso de recuperación de la capa vegetal y estabilización del terreno, realizado previamente con geomantos (Figura 4) (estructuras en malla formadas por materiales inorgánicos), como mallas metálicas o material sintético, los cuales, según el caso pueden ser adaptados con trinchos para procesos de estabilización de taludes de forma complementaria.

Figura 4

Articulación de trinchos y geomantos para la estabilización de un talud inestable en la vía Bogotá – Fusagasugá, Cundinamarca, Colombia



Fuente: Elaboración propia, 2024.

Los biomantos, por otro lado, se basan en el uso de material orgánico o vegetal que proporcionan una mejor absorción de nutrientes en el suelo (Figura 5) y que a su vez funcionan como anclajes para el mismo, siendo amigables con el medioambiente por su naturaleza biodegradable, se utilizan fibras vegetales (principalmente fibra de coco), que disminuyen la huella de carbono y la contaminación remanente en el suelo luego de dichos procesos de estabilización. Mientras las raíces de las plantas ayudan a

anclar el suelo, la cobertura vegetal reduce el impacto de las gotas de lluvia, el viento y el flujo de agua superficial. (Lewis, Hagen, y Salisbury, 2001).

Figura 5
Biomanto en estabilización talud

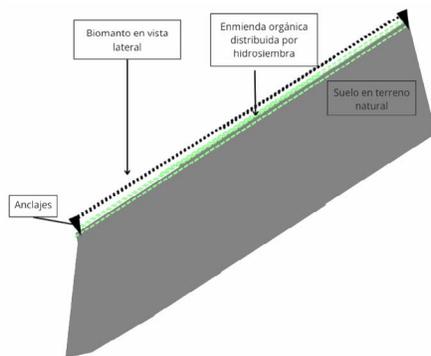


Fuente: Aquanea, (sf).

Si bien los biomantos son una técnica bioingenieril efectiva para revegetar taludes y laderas de manera rápida y económica (Lewis, Hagen, y Salisbury, 2001). Se ha desarrollado la posibilidad de adicionar fertilizantes o enmiendas orgánicas (Figura 6) mediante procesos manuales o de hidrosiembra (Figura 7) una vez establecidos los biomantos, mostrados en la figura 4, dichas adiciones mejoran la fertilidad del suelo y contribuyen al proceso de revegetación, donde predominan gramíneas y vegetaciones arbustivas bajas, dichas enmienda han mostrado tener resultados positivos en la recuperación del suelo apoyando las condiciones para que las plantas introducidas proliferen exitosamente.

Figura 6

Diagrama de un biomanto con dosificación de enmienda orgánica de hidrosiembra en zona de talud erosionado en vista horizontal



Fuente: Elaboración propia, 2024.

Figura 7

Proceso de hidrosiembra en geomantos sintéticos



Fuente: TDM Colombia (sf).

Algunas mezclas de dichas agregaciones ya son conocidas en el mercado y establecidas en la industria (principalmente norteamericana), existen estudios recientes (Pineda Herrera, Pineda, y Larrañaga, 2022) en los cuales se investiga la posibilidad de articular biomantos con material orgánico compuesto por biocarbón junto con el efecto nutritivo de EM (Microorganismos eficientes) en el crecimiento de plantas *Lupinus sp.* Bajo condiciones controladas en Bogotá, Colombia. Existen beneficios en el crecimiento de las plantas comparado con casos de control en los que solo se utilizó la fibra de coco como sustrato, si bien las agregaciones experimentales

requieren mayor investigación, tienen el potencial de ampliar la gama de productos disponibles para la industria, generando una mayor adaptabilidad de las mezclas agregadas a casos específicos, evitando así el uso de especies generalistas y no nativas en los casos de acción.

Otros estudios realizados previamente soportan el uso de enmiendas orgánicas, tales como López Nuñez, (2020), Bashan, Salazar, Moreno, Lopez y Linderman (2012) y Soler Perez, (2023), Zhang et al., (2013), donde en diferentes casos de erosión, y junto con el uso de biomantos con agregados han mostrado un aumento de disponibilidad de nutrientes en el suelo, sin embargo, en ciertos casos con aumentos inesperados de ciertos elementos como el hierro hasta niveles tóxicos.

Ahora bien, la revegetación de los taludes en terrazas y biomantos es un proceso de suma importancia para la estabilización del terreno, sin embargo, el uso de especies nativas adaptadas a las condiciones climáticas y edáficas de los sitios afectados es fundamental para recuperar la cobertura vegetal y proteger el suelo de la erosión sin afectar negativamente las dinámicas ecosistémicas previamente perdidas (Swaine et al., 2017).

En este contexto, la selección de especies vegetales juega un papel fundamental en el éxito a largo plazo de la restauración. La utilización de especies nativas, adaptadas a las condiciones climáticas y edáficas del sitio es fundamental por múltiples razones ecológicas y sostenibles, entre las cuales se encuentran beneficios en la conservación de la biodiversidad y un mantenimiento de los ciclos bioquímicos y la adaptación al ecosistema (FAO y UNEP, 2020).

Por otro lado, si bien el uso indebido de especies no nativas pueden resultar en un rápido crecimiento poblacional, o teniendo características deseables para la revegetación en el corto plazo, su uso puede llegar generar consecuencias negativas para el ecosistema en el largo plazo, entre las cuales se encuentran el desplazamiento de las especies nativas y alteraciones a los ciclos bioquímicos del ecosistema, afectando la disponibilidad de agua y de nutrientes, el ciclo del agua e inevitablemente, la calidad del suelo, junto con impactos en la fauna y flora local, con el riesgo latente de hibridación de especies nativas y no nativas (en caso de cercanía filogenética), causando un deterioro genético de las poblaciones locales y una eventual pérdida de la biodiversidad en el largo plazo (Zuazo y Pleguezuelo, 2009) (Figura 8).

Figura 8

Proceso de recolonización vegetal en geomanto de fibra sintética, comparado con un manto sin vegetación, en la vía Bogotá – Melgar, Cundinamarca, Colombia



Fuente: Elaboración propia, 2024.

Teniendo esto en cuenta, es importante tener conocimiento acerca de la distribución de especies nativas de cada zona donde se busque realizar un proceso de revegetación con técnicas bioingenieriles, y según esto, utilizar plantas nativas para este propósito, por lo cual es importante tener conocimiento acerca de los grupos de plantas más utilizados en los procesos de recuperación del suelo en Colombia, entre los que se encuentran las gramíneas, leguminosas, ciperáceas, solanáceas y asteráceas (Figura 9).

a) Gramíneas (*Poaceae*): Los pastos poseen una amplia distribución en diversos ecosistemas, tienen una alta tolerancia a la sequía y al estrés salino, junto con crecimiento rápido y vigoroso tienen la capacidad de formar una red de raíces eficiente que favorece la agregación del suelo y la retención de agua. Han sido ampliamente usadas en el control de la erosión hídrica y eólica, junto con revegetación de taludes y laderas, restauración de áreas degradadas por pastoreo o agricultura, creación de praderas y pastizales (ver figura 8) (García-García y DíazTimoté, 2022).

b) Leguminosas (*Fabaceae*): Las legumbres poseen la capacidad de fijar nitrógeno atmosférico al suelo mediante interacciones simbióticas con bacterias, su aplicación mejora la fertilidad del suelo, gracias a su crecimiento rápido y producción de biomasa. Se aplica en la revegetación de áreas degradadas y permite un positivo control de la erosión y recuperación de la fertilidad del suelo (Gómez Ruiz, 2011).

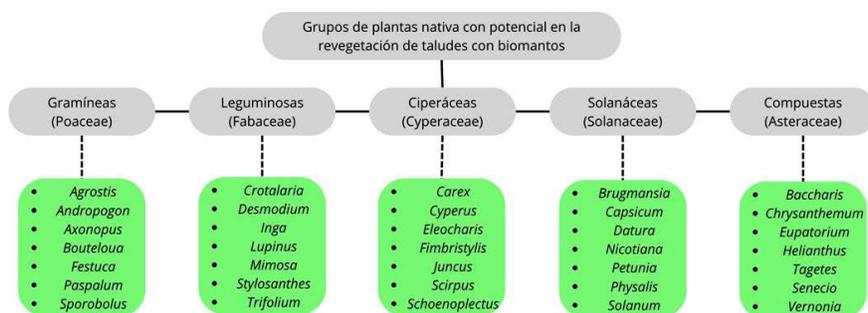
c) Ciperáceas (*Cyperaceae*): Tienen una amplia distribución en ecosistemas húmedos y acuáticos, alta tolerancia a la inundación y al estrés salino, poseen un crecimiento en mechones densos que favorecen la retención del suelo y la filtración de agua. Son ampliamente utilizadas en el control de la erosión en riveras y márgenes de ríos, revegetación de áreas húmedas y pantanosas, fitorremediación de suelos contaminados, y creación de biofiltros (Lovera y Cuenca, 1996).

d) Solanáceas (*Solanaceae*): Varias especies son pioneras en la sucesión ecológica, junto con su amplia distribución y resistencia, crecimiento rápido y producción de biomasa. Son controladoras de erosión, recuperación de la fertilidad en el suelo y creación de coberturas vegetales para la protección del suelo (Saavedra, Vallarino, Mejía, y Centella, 2021).

e) Compuestas (*Asteraceae*): Su alta diversidad de especies con diferentes adaptaciones, resistencia a gran variedad de ecosistemas y estrés, junto con crecimiento rápido permiten un control de la erosión, revegetación y restauración de la fertilidad del suelo, creando eficazmente coberturas vegetales para la protección del suelo (Morales Meza, 2020; Herrera Torres, 2022). En Colombia existen aproximadamente 200 especies distribuidas en 120 géneros, todos con potencial de recuperación vegetal en biomantos (García-García y Díaz-Timoté, 2022).

Figura 9

Grupos de plantas con potencial de revegetación de biomantos en Colombia



Fuente: Elaboración propia, 2024.

Las plantas pertenecientes a los grupos previamente expuestos han sido utilizadas en diversos estudios en Colombia y en América, donde han mostrado resultados positivos en la recuperación de biomantos. Ahora bien, existe la posibilidad de apoyar el crecimiento vegetal y añadir especies a las previamente utilizadas, tal como Pineda Herrera, Pineda, y Larrañaga (2022), donde encontraron un crecimiento positivo en plantas del género *Lupinus* bajo el crecimiento de un biomanto de fibra de coco junto con el efecto en conjunto de microorganismos eficientes (EM) y biochar en condiciones controladas.

Dichos estudios base abren la posibilidad de realizar investigaciones adicionales que permitan un óptimo desarrollo de metodologías más avanzadas y versátiles a la hora de estabilizar terrenos con las técnicas mencionadas en este trabajo. De la misma forma, la articulación de varias especies vegetales en terrenos expuestos permite explorar procesos de revegetación integrales, como se muestra en la figura 10, donde en un manto ubicado en la vía Bogotá – Fusagasugá se evidencia el crecimiento en conjunto de Poáceas del género *Agrostis*, junto con calabazas enredaderas de la familia *Cucurbitaceae* (género *Cucúrbita*), sembradas por la comunidad de la zona, generando un aprovechamiento social y una optimización de los recursos disponibles en la tierra.

Figura 10

Proceso de revegetación en manto de estabilización donde se articulan Poáceas y Cucurbitáceas en la vía Bogotá – Fusagasugá, Cundinamarca, Colombia



Fuente: Elaboración propia, 2024.

Es importante el continuo monitoreo de los ecosistemas para obtener información en el tiempo que permita obtener conclusiones contundentes, (Bustamante et al., 2016) para los eventos en los que se aplican soluciones de bioingeniería, el monitoreo a largo plazo es necesario para comprender mejor los efectos de las soluciones integrales para la deforestación y la erosión. Permitiendo desarrollar eventualmente estrategias más efectivas para la recuperación del suelo y la restauración de la biodiversidad (Paneiva, 2024). Igualmente, la colaboración entre instituciones académicas, gubernamentales y organizaciones no gubernamentales es clave para avanzar en este campo.

Si bien la problemática de la deforestación y la erosión del suelo no es exclusiva de Colombia, es un desafío global, pues la colaboración internacional es fundamental para compartir conocimientos, recursos y experiencias en la lucha contra estos problemas. Iniciativas académicas conjuntas

pueden fortalecer los esfuerzos de conservación y restauración a nivel local y global (Muñoz Ávila, 2022).

De la igual manera, es importante tomar acción respecto la educación y concienciación sobre la importancia de la conservación del suelo, pues son fundamentales para abordar esta problemática. Es crucial involucrar a las comunidades locales en la gestión sostenible de los recursos naturales y fomentar prácticas que protejan el medioambiente, pues la participación comunitaria tiene la potencialidad de ser un motor de cambio hacia un uso más responsable del suelo (Rico Calvano y Rico Fontalvo, 2014). Esto, junto con la implementación de políticas públicas efectivas es esencial para abordar la deforestación y la erosión del suelo en Colombia de forma integral. Incluyendo la regulación de actividades ilegales, junto con la promoción de prácticas agrícolas sostenibles y la protección de áreas críticas para la biodiversidad, dichas políticas deben ser integrales y considerar las necesidades de las comunidades locales y ecosistémicas para proteger y promover el desarrollo del capital ambiental, social, humano y económico de forma sostenible.

Conclusiones

Finalmente, la acción de recuperación de ecosistemas degradados es una medida esencial para recuperar el suelo de las afectaciones generadas por el impacto antrópico, dichas acciones incluyen: la recuperación y estabilización del suelo por medio de técnicas de bioingeniería para dar paso a procesos de reforestación sustentables, la implementación de prácticas agrícolas sostenibles y la promoción de la biodiversidad.

Si bien estas estrategias no solo ayudan a restaurar la capa vegetal, también contribuyen a la mitigación del cambio climático y a la mejora de la calidad del agua y la captura de carbono a gran escala. Aunque la implementación de soluciones propuestas por la bioingeniería y el uso de biomantos es una solución establecida, es imperativo continuar realizando estudios de estas técnicas con la finalidad de obtener una comprensión más profunda de sus efectos a largo plazo y su aplicabilidad en diferentes condiciones ambientales, generando desarrollo constante en el campo y permitiendo la optimización de su uso y mitigando a mayor escala posibles

riesgos asociados, asegurando su eficacia y sostenibilidad en la restauración de ecosistemas con suelos degradados y erosionados.

Referencias bibliográficas

- Bashan, Y., Salazar, B. G., Moreno, M., Lopez, B. R., & Linderman, R. G. (2012). Restoration of eroded soil in the Sonoran Desert with native leguminous trees using plant growth-promoting microorganisms and limited amounts of compost and water. *Journal of Environmental Management*, 102, 26-36. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2011.12.03>
- Bebbington, A., & Williams, M. (2010). Mining and development in Peru: With special reference to the Rio Blanco Project. *Journal of Latin American Geography*, 9(1), 146-165. <https://perusupportgroup.org.uk/wp-content/uploads/2019/09/Mining-and-Developmentin-Peru-with-special-reference-to-the-Rio.pdf>
- Benítez Moreno, E & Sarmiento Colmenares, L. (2014). *Guía práctica para la estabilización de taludes generados por la construcción de plataformas para perforación mediante la técnica de hidrosiembra, en el área de Campo Llanito Ecopetrol* S.A. 2013. Bucaramanga: Universidad de Santander, 2014.
- Bustamante, M. M. C., Roitman, I., Aide, T. M., Alencar, A., Anderson, L. O., Aragão, L. E. O. C., & Villa, P. M. (2012). Toward an integrated monitoring framework to assess the effects of tropical forest degradation and recovery. *Global Change Biology*, 18(2), 807-822. <https://doi.org/10.1111/gcb.13087>
- FAO, & UNEP. (2020). *The state of the world's forests 2020: Forests, biodiversity and people*.
- FAO, UNEP. <https://www.fao.org/3/ca8642en/ca8642en.pdf>
- García-García, J. A., & Díaz-Timoté, J. (2022). Disponibilidad y eficiencia en el uso de recursos naturales, biodiversidad y servicios ecosistémicos. *Biodiversidad en la Práctica*, 7, e1120-e1120. <https://doi.org/10.21068/26193124.1120>
- Geomallas y mantas. (s/f). *Aquanea*. <https://aquanea.com/geomallas-mantas-taludes/>
- Gómez Ruiz, P. (2011). *Efecto de la densidad de siembra sobre las interacciones biológicas entre las leguminosas *Lupinus bogotensis* y *Vicia benghalensis* con las*

- nativas Solanum oblongifolium y Viburnum tinoides en parcelas experimentales de restauración ecológica del bosque altoandino* (Tesis de maestría, Maestría en Ciencias - Biología, Universidad Nacional de Colombia). Repositorio de la Universidad Nacional de Colombia. <https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/11332>
- González, D. E. E., Ernesto, D., Leonel, O. C., & Basto, R. (2014). *Viabilidad del uso del pasto vetiver para la estabilización de taludes en Colombia* [Tesis de grado, Facultad de Ingeniería, Programa de Ingeniería Civil, Universidad Católica de Colombia]. <https://repository.ucatolica.edu.co/server/api/core/bitstreams/77e09ef9-5b3a-4bae-a60f4835841bb457/content>
- Herrera, S. V. (2022). *Eficiencia de Helianthus annuus en la fitorremediación de suelos contaminados por plomo en pasivos ambientales mineros en los últimos 10 años* [Tesis de licenciatura, Universidad Privada del Norte]. Repositorio de la Universidad Privada del Norte. <https://hdl.handle.net/11537/33903>
- IGAC. (2022). *Actualización de áreas homogéneas de tierras a nivel municipal con fines multipropósito* [Instructivo de sistema de gestión integrado del IGAC]. Instituto Geográfico Agustín Codazzi. https://www.igac.gov.co/sites/default/files/listadomaestro/in-agr-pc0501_v1_actualizacion_de_areas_homogeneas_de_tierras.pdf
- Lal, R. (2003). *Soil erosion and the global carbon budget*. *Environment International*, 29(4), 437-450. [https://doi.org/10.1016/S0160-4120\(02\)00192-7](https://doi.org/10.1016/S0160-4120(02)00192-7)
- Lewis, L., Hagen, S., & Salisbury, S. (2001). *Soil bioengineering for slope stabilization* (WA-RD 491.1). Washington State Department of Transportation. <https://www.wsdot.wa.gov/research/reports/fullreports/491.1.pdf>
- Li, M. H., & Eddleman, K. E. (2002). Biotechnical engineering as an alternative to traditional engineering methods: A biotechnical streambank stabilization design approach. *Landscape and Urban Planning*, 60(4), 225-242. [https://doi.org/10.1016/S0169-2046\(02\)00057-9](https://doi.org/10.1016/S0169-2046(02)00057-9)
- López Núñez, R. (2020). *Estrategias para la recuperación de suelos degradados incluyendo el uso de enmiendas orgánicas* [Presentación online]. <https://digital.csic.es/handle/10261/235283>
- Minambiente. (2015). *Guía de restauración ecológica para Colombia*. Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. <https://www.minambiente.gov.co/la-deforestacion-baja-en-2023-y-en2024enfrentaamenazas/#:~:text=La%20ministra%20se%20B1al%C3%B3%20>

- que%2C%20pese,el%20fen%C3%B3meno%20de%20El%20Ni%C3%B1o.
- Minambiente. (2024). *La deforestación baja en 2023 y en 2024 enfrenta amenazas*. Ministerio de Sostenible. <https://www.andi.com.co/Uploads/Plan%20nacional%20de%20restauraci%C3%B3n.pdf>
- Morales Meza, M. J. (2020). *Capacidad de absorción del girasol (Helianthus annuus) en suelos contaminados a diferentes concentraciones de plomo nivel laboratorio* [Tesis de grado, Universidad Peruana Unión]. UPEU-Tesis. <https://repositorio.upeu.edu.pe/handle/20.500.12840/3188>
- Muñoz Ávila, L. (2022). *La implementación conjunta del Acuerdo de París y los objetivos de desarrollo sostenible en Colombia* (Tesis de maestría, Maestría en Derecho y Economía del Cambio Climático, FLACSO Argentina). <http://hdl.handle.net/10469/18899>
- Paneiva, A. (2024). *Influencia de la estructura del paisaje en el proceso de revegetación natural en locaciones petroleras abandonadas* (Tesis de licenciatura, Facultad de Ciencias del Ambiente y la Salud, Universidad Nacional del Comahue). https://repositoriosdigitales.mincyt.gov.ar/vufind/Record/RDIUNCO_42c4ff5f95e1b4aa97f1c641801055b
- Paz Zambrano, L. E. (2022). *Estudio de la Bioingeniería como alternativa para la estabilización de suelos* [Trabajo de grado especialización]. Universidad de Antioquia. https://bibliotecadigital.udea.edu.co/dspace/bitstream/10495/29249/1/PazLuis_2022_Bioingenier%C3%ADaDeSuelos.pdf
- Peláez, J. D. L., & Correa, J. A. (2004). *Evaluación del impacto ambiental de proyectos de desarrollo*. Universidad Nacional de Colombia sede Medellín, Departamento de Ciencias Forestales. <https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/3257>
- Pineda Herrera, J. C., Pineda, J. A., & Larrañaga, S. C. (2022). *Development of a hybrid coconut fiber-biochar biomantle for bioengineering applications*. Paper presented at the 20th LACCEI International Multi-Conference for Engineering, Education, and Technology: “Education, Research and Leadership in Post-pandemic Engineering: Resilient, Inclusive and Sustainable Actions”, Boca Raton, FL, USA. https://laccei.org/LACCEI2022-BocaRaton/work_in_progress/WP427.pdf
- Rico Calvano, F., & Rico Fontalvo, H. M. (2014). El uso del suelo, ¿un

- problema de capacidad productiva y de políticas públicas? *Revista Logos, Ciencia & Tecnología*, 5(2), 213-231. <https://www.redalyc.org/pdf/5177/517751549002.pdf>
- Rojas, W. G., Castro, D. A. R., & Basto, A. R. (2015). *Viabilidad de la implementación de fajinas para la estabilización de taludes en Colombia* [Tesis de pregrado, Universidad Católica de Colombia]. <http://hdl.handle.net/10983/2555>
- Saavedra, F. G., Vallarino, R., Mejía, G., & Centella, D. (2021). Bioingeniería de taludes: Evaluación del uso de árboles y arbustos como posible mecanismo para incrementar el factor de seguridad. *Revista de Iniciación Científica*, 7(2), 26-38. <http://portal.amelica.org/ameli/journal/338/3382820003/3382820003.pdf>
- Sánchez Mateus, C. P. (2015). *Marco normativo para la minería ilegal como actividad no regulada en Colombia y caso Chocó* [Trabajo de especialización, Universidad Militar Nueva Granada]. <http://hdl.handle.net/10654/7077>
- Schiechtl, H. (1980). *Bioengineering for land reclamation and conservation*. University of Alberta Press. <https://www.sidalc.net/search/Record/un-fao:611736/Description>
- SER (Society for Ecological Restoration). (2004). *The SER International Primer on Ecological Restoration*. Society for Ecological Restoration International Science & Policy Working Group. https://www.ctahr.hawaii.edu/littonc/PDFs/682_SER-Primer.pdf
- Sklenicka, P., Zouhar, J., Molnarova, K. J., Vlasak, J., Kottova, B., Petrzelka, P., & Walmsley, A. (2020). Trends of soil degradation: Does the socio-economic status of landowners and land users matter? *Land Use Policy*, 95, 103992. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2019.05.011>
- Smith, P. (2008). Soil organic carbon dynamics and land-use change. *En Land use and soil resources* (pp. 9-22). Elsevier. <https://abdn.elsevierpure.com/en/publications/land-use-change-and-soilorganic-carbon-dynamics>
- Swaine, M. D., & Whitmore, T. C. (1988). On the definition of ecological species groups in tropical forests. *Vegetation*, 75, 81-86. <https://doi.org/10.1007/BF00044629>
- Zhang, Q., Wang, Y., Wu, Y., Wang, X., Du, Z., Liu, X., & Song, J. (2013). Effects of biochar amendment on soil thermal conductivity, reflectance, and temperature. *Soil Science Society of America Journal*, 77(5), 1478-

1487. <https://doi.org/10.2136/sssaj2012.0180>

Zuazo, V. H. D., & Pleguezuelo, C. R. R. (2009). *Soil-erosion and runoff prevention by plant covers: A review*. In Sustainable agriculture (pp. 785-811). https://doi.org/10.1007/978-90-4812666-8_48

Sostenibilidad, sustentabilidad y medioambiente. Nuevas tendencias.

Se terminó de editar en diciembre de 2024

en los talleres de Astra Ediciones

Av. Acueducto No. 829

Colonia Santa Margarita, C. P. 45140

Zapopan, Jalisco, México.

33 38 34 82 36

E-mail: edicion@astraeditorial.com.mx

www.astraeditorialshop.com

El medioambiente conceptualizado como un sistema natural ha estado presionado por fuerzas antrópicas que en las últimas décadas se han convertido en fuerzas entrópicas, pues transforman y modifican muchas veces de forma irreversible la morfología de las condiciones originarias de los subsistemas naturales.

Sostenibilidad, sustentabilidad y medioambiente. Nuevas tendencias, es una obra que articula nueve investigaciones preocupadas por la gestión y planificación de la materia y energía, donde suelo, agua, y aire, son analizados bajo diferentes enfoques multidisciplinares.

ISBN: 978-84-10215-96-2



9 788410 215962



Consulta y descarga



Universidad
Autónoma
de Nayarit

