



Agua, suelo agrícola e hidrocarburos:

San Fernando un caso de estudio

Coordinador:

Enoc Alejandro García Rivera



editorial
fontamara



VERDAD, BELLEZA, PROBIIDAD

**Agua,
suelo agrícola e
hidrocarburos:**
San Fernando un
caso de estudio

Agua, suelo agrícola e hidrocarburos: San Fernando un caso de estudio /Enoc Alejandro García Rivera coordinador.—Cd. Victoria, Tamaulipas : Universidad Autónoma de Tamaulipas ; Ciudad de México : Editorial Fontamara , 2025.

87 págs. ; 17 x 23 cm.

Desarrollo y crecimiento económicos

LC: HD1518 A3.8 2025

DEWEY: 338.9 JH

Universidad Autónoma de Tamaulipas
Matamoros SN, Zona Centro
Ciudad Victoria, Tamaulipas C.P. 87000
D. R. © 2025

Consejo de Publicaciones UAT
Centro Universitario Victoria
Centro de Gestión del Conocimiento. Segundo Piso
Ciudad Victoria, Tamaulipas, México. C.P. 87149
Tel. (52) 834 3181-800 • extensión: 2905
cpublicaciones@uat.edu.mx • www.uat.edu.mx • https://libros.uat.edu.mx/

Libro aprobado por el Consejo de Publicaciones UAT
ISBN UAT: 978-607-8888-66-5

Editorial Fontamara, S.A. de C.V.
Av. Hidalgo No. 47-B, Colonia Del Carmen
Alcaldía de Coyoacán, 04100, CDMX, México
Tels. 555659-7117 y 555659-7978
contacto@fontamara.com.mx • coedicion@fontamara.com.mx • www.fontamara.com.mx
ISBN Fontamara: 978-607-736-966-0

Se prohíbe la reproducción total o parcial de esta obra incluido el diseño tipográfico y de portada, sea cual fuera el medio, electrónico o mecánico, sin el consentimiento del Consejo de Publicaciones UAT.
Libro digital

Esta obra y sus capítulos fueron sometidos a una revisión de pares a doble ciego, la cual fue realizada por especialistas pertenecientes al Sistema Nacional de Investigadoras e Investigadores. Asimismo, fueron aprobados para su publicación por el Consejo de Publicaciones de la Universidad Autónoma de Tamaulipas y el Comité Interno de la editorial Fontamara.



Agua, suelo agrícola e hidrocarburos: San Fernando un caso de estudio

Coordinador:
Enoc Alejandro García Rivera





MVZ MC Dámaso Leonardo Anaya Alvarado
PRESIDENTE

Dr. Fernando Leal Ríos
VICEPRESIDENTE

Dra. Dora María Lladó Lárraga
SECRETARIA TÉCNICA

Mtro. Eduardo García Fuentes
VOCAL

Dra. Rosa Issel Acosta González
VOCAL

CP Jesús Francisco Castillo Cedillo
VOCAL

MVZ Rogelio de Jesús Ramírez Flores
VOCAL

Comité Editorial del Consejo de Publicaciones de la Universidad Autónoma de Tamaulipas

Dra. Lourdes Arizpe Slogher • Universidad Nacional Autónoma de México | **Dr. Amalio Blanco** • Universidad Autónoma de Madrid, España | **Dra. Rosalba Casas Guerrero** • Universidad Nacional Autónoma de México | **Dr. Francisco Díaz Bretones** • Universidad de Granada, España | **Dr. Rolando Díaz Lowing** • Universidad Nacional Autónoma de México | **Dr. Manuel Fernández Ríos** • Universidad Autónoma de Madrid, España | **Dr. Manuel Fernández Navarro** • Universidad Autónoma Metropolitana, México | **Dra. Juana Juárez Romero** • Universidad Autónoma Metropolitana, México | **Dr. Manuel Marín Sánchez** • Universidad de Sevilla, España | **Dr. Cervando Martínez** • University of Texas at San Antonio, E.U.A. | **Dr. Darío Páez** • Universidad del País Vasco, España | **Dra. María Cristina Puga Espinosa** • Universidad Nacional Autónoma de México | **Dr. Luis Arturo Rivas Tovar** • Instituto Politécnico Nacional, México | **Dr. Aroldo Rodrigues** • University of California at Fresno, E.U.A. | **Dr. José Manuel Valenzuela Arce** • Colegio de la Frontera Norte, México | **Dra. Margarita Velázquez Gutiérrez** • Universidad Nacional Autónoma de México | **Dr. José Manuel Sabucedo Cameselle** • Universidad de Santiago de Compostela, España | **Dr. Alessandro Soares da Silva** • Universidad de São Paulo, Brasil | **Dr. Akexandre Dorna** • Universidad de CAEN, Francia | **Dr. Ismael Vidales Delgado** • Universidad Regiomontana, México | **Dr. José Francisco Zúñiga García** • Universidad de Granada, España | **Dr. Bernardo Jiménez** • Universidad de Guadalajara, México | **Dr. Juan Enrique Marciano Medina** • Universidad de Puerto Rico-Humacao | **Dra. Ursula Oswald** • Universidad Nacional Autónoma de México | **Arq. Carlos Mario Yori** • Universidad Nacional de Colombia | **Arq. Walter Debenedetti** • Universidad de Patrimonio, Colonia, Uruguay | **Dr. Andrés Piqueras** • Universitat Jaume I, Valencia, España | **Dra. Yolanda Troyano Rodríguez** • Universidad de Sevilla, España | **Dra. María Lucero Guzmán Jiménez** • Universidad Nacional Autónoma de México | **Dra. Patricia González Aldea** • Universidad Carlos III de Madrid, España | **Dr. Marcelo Urra** • Revista Latinoamericana de Psicología Social | **Dr. Rubén Ardila** • Universidad Nacional de Colombia | **Dr. Jorge Gissi** • Pontificia Universidad Católica de Chile | **Dr. Julio F. Villegas †** • Universidad Diego Portales, Chile | **Ángel Bonifaz Ezeta †** • Universidad Nacional Autónoma de México

Índice

Introducción	9
Capítulo 1 Municipio de San Fernando: entre la agricultura y los hidrocarburos <i>Enoc Alejandro García Rivera</i>	11
Capítulo 2 Diagnóstico sobre la interacción química entre el recurso hídrico y los hidrocarburos en el municipio de San Fernando <i>Gloria Sandoval Flores</i>	31
Capítulo 3 Elementos inorgánicos potencialmente tóxicos en zonas de extracción de hidrocarburos <i>Adán Waldemar Echeverría García</i>	51
Capítulo 4 Dispositivos y sensores para uso en zonas de extracción de hidrocarburos <i>Johnatan Ahisamac Salazar Pérez, Adán W. Echeverría-García y Hugo Alberto Solís Martínez</i>	77

Introducción

La industria originada por los hidrocarburos genera impresiones que se han estampado de una forma tal sobre las dimensiones y componentes de las sociedades nacionales que han sido capaces de modificarlas, moldearlas o reconfigurarlas a partir de los alcances y matices que surgen de su naturaleza y de la dinámica de su industria, así como por el tipo de objeto o dimensión de la colectividad estatal donde terminan incidiendo o reflejándose. En ese sentido, la impresión más generalizada del petróleo se estampa a través de la fuerza y el impulso que propaga en el sector económico, lo que le ha permitido adjudicarse una relevancia financiera y política. Sin embargo, a la par existe otra dinámica que también se propicia con la explotación de los hidrocarburos y que goza de la misma capacidad para incidir en las dimensiones de las sociedades estatales. En contraparte de las condiciones de beneficio que propicia en el contexto económico, ocasiona impactos de carácter lesivo en detrimento de los elementos naturales y los derechos humanos, por ejemplo: la degradación de los principales recursos abióticos de la naturaleza: aire, agua y tierra, elementos indispensables para la supervivencia y desarrollo del ser humano.

En particular, el suelo se ha tornado en un elemento bastante propenso a recibir los impactos de la industria petrolera. Resulta pertinente agregar que los impactos propiciados por la industria de los hidrocarburos en suelos destinados a la actividad agrícola tienden a extender sus efectos hacia otros componentes y esferas. En definitiva, la contaminación se expande y trasciende a través de distintos ámbitos para continuar estampando sus efectos sobre otros aspectos y elementos que incluyen bienes y valores tutelados por los derechos fundamentales.

El recurso hídrico también es un elemento propenso a captar la contaminación producida por la industria de los hidrocarburos. Sobre esto, la práctica de las operaciones de traslado, transporte y almacenamiento de hidrocarburos afectan la integridad física, química y biológica de las reservas naturales más importantes de la Tierra, entre ellos, el recurso hídrico. La industria de los hidrocarburos genera una impresión diversa a la preponderantemente económica sobre las dimensiones de las sociedades nacionales.

Ahora bien, ambas dinámicas han propiciado que se organicen las estructuras político-jurídicas en dirección de intensificar o mitigar, según sea el caso, sus impactos económicos, sociales o ambientales. A lo largo de la historia económica contemporánea de México se ha comprobado que entre más amplia sea la actividad de explotación del recurso natural fósil, mayor es el estímulo al desarrollo económico nacional. La segunda década del siglo XXI da testimonio de lo anterior al situarse como el comienzo del impulso estatal más significativo en la época reciente de la industria mexicana de los hidrocarburos. Empuje en donde podría identificarse a la serie de eventos jurídicos, políticos y administrativos derivados de la planeación nacional 2013-2018, como los precursores públicos que le darían forma al inicio de esta nueva fase de reactivación petrolera.

En términos prácticos, estas directrices se traducirían a la postre en asignaciones y contratos de exploración y extracción. De este conjunto, cinco asignaciones y dos contratos se otorgaron áreas de exploración y extracción en el municipio de San Fernando, Tamaulipas, con vigencia de treinta años, los cuales para 2019 habían generado alrededor de 1 450 pozos extracción de gas condensado, húmedo, natural y seco, entre otros derivados del petróleo: en suma, estas actividades generaron infraestructura para otras vinculadas a su desarrollo, tales como estaciones de recolección y gasoductos para traslado de petrolíferos. Ahora bien, este municipio de Tamaulipas está posicionado como el más importante en producción de sorgo a nivel estatal y nacional, lo que representa para sus pobladores la actividad base de su desarrollo social y económico. Lugar al que ha accedido como resultado de la actividad agrícola que despliegan los productores sobre una superficie aproximada de 210 000 hectáreas, y a las condiciones ecosistémicas que se presentan en ese espacio territorial.

Es a partir de este escenario como se originó el material del presente libro, el cual buscó conjugar la participación de diversas áreas, metodologías y perfiles científicos para su análisis, ya que los procesos sociales, económicos y ambientales que se configuran en ese espacio geográfico demandaban un examen científico igual de heterógamo que aportara al debate de estos temas tan comunes hoy en día. En efecto, este material bibliográfico surge de la idea de realizar un ejercicio institucional de colaboración multidisciplinaria para el desarrollo de estudios socioambientales en materia de energía que permitiera propiciar un primer acercamiento al estudio integral de estos fenómenos, el cual girará en torno de un examen inicial de los impactos que genera la industria de los hidrocarburos, en la salud del suelo y agua de las zonas de cultivo de sorgo del municipio de San Fernando.

Capítulo 1

Municipio de San Fernando: entre la agricultura y los hidrocarburos

Enoc Alejandro García Rivera
Conahcyt-UAT

I. Introducción

En 2013, el gobierno federal instaló en la democratización de la productividad el impulso al desarrollo económico y social nacional y regional de México, y al sector energético de los hidrocarburos lo situó como su principal instrumento para concretizarlo. Con esa política pública, el Estado consideró impulsar el crecimiento económico y la equidad social de las próximas décadas. A través de la planeación nacional 2013-2018, el gobierno federal implementó la estrategia de democratizar la productividad como una política pública transversal, cuya función primordial sería la de establecerse como el principal catalizador jurídico-administrativo para la consecución de las metas nacionales planteadas, especialmente aquellas vinculadas con el desarrollo económico.

De acuerdo con las cifras que se presentaron en ese periodo, el sector económico productivo de México se ubicaba en una posición media como destino propicio de negocios; mientras que, en materia de empleo, su tasa de desempleo entre la población económicamente activa era del 30.6 %. A partir de estas condiciones socioeconómicas, el gobierno democratizó los recursos productivos mediante un entorno de negocios soportado en un marco normativo que facilitase la disposición de los bienes públicos que pudiesen operar las empresas para generar prosperidad. Estas circunstancias e ideas llevaron al gobierno a formular, como directriz esencial de esta política transversal, la realización de acciones que eliminasen los obstáculos o ineficiencias que limitaran el potencial productivo de los ciudadanos y las empresas. En los fines y directivas de las metas nacionales de un México próspero, incluyente y con responsabilidad global, se hace más evidente el contenido teórico que esta estrategia transversal buscó imprimir en la planeación gubernamental para

el contexto nacional mexicano, dado que en esas líneas se observaban las acciones orientadas a instaurar la explotación de los hidrocarburos, como la principal actividad económica para impulsar el progreso económico y social del país.

Según las estrategias y metas nacionales planteadas, era fundamental dotar de insumos energéticos baratos y de calidad a los sectores económicos y sociales del país con el propósito de reducir los costos de producción de las empresas y de vida de las familias, incrementando la productividad del país, lo que a su vez generaría desarrollo económico y, por ende, bienestar social entre la población. Democratizar los hidrocarburos para revertir entonces el déficit de la producción de energía, sería la directriz prioritaria que el gobierno se fijaría para lograr un México próspero, incluyente y globalmente responsable.

De acuerdo con la propuesta integral en el documento oficial de Planeación Estatal, era necesario modificar los esquemas administrativos y legales relacionados con el bien nacional de los hidrocarburos, a efecto de elevar su índice de recuperación y obtención, que garantice una producción suficiente de energéticos. Era imprescindible realizar una reestructuración administrativa y jurídica en el área petrolera que detonara nuevos proyectos de inversión, con el fin de incrementar la exploración y producción de petróleo crudo y gas natural.

Establecidas las directivas políticas y administrativas para el sector nacional, lo subsecuente era, de acuerdo con la planeación, suprimir los impedimentos legales que, de acuerdo con el gobierno nacional, afectaban, en lo general, el desarrollo de la industria petrolera mexicana y, en lo particular, el desarrollo de más y mayores proyectos de exploración, extracción y explotación que nutriesen de recurso a la cadena productiva de los hidrocarburos.

De acuerdo con el gobierno federal, era impostergable dicha reestructuración, de acuerdo con las bases legales y los objetivos políticos y administrativos planteados para el sector energético. La actualización y desarrollo del marco normativo que orientaría la ambicionada renovación de la industria petrolera mexicana era imperativo. Así, el 12 de agosto de 2013 se presentó la iniciativa de Decreto de reforma constitucional que propondría reformar los artículos 27 y 28 de la Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos del 5 de febrero de 1917, con el fin de crear un entorno legal que imprimiera dinamismo a la economía nacional mediante el aprovechamiento de los hidrocarburos, en aras de generar inversión, empleo y abasto de energía.

La primera modificación legal que se propuso, a través de la Iniciativa de Reforma del 13 de agosto de 2013, fue eliminar la prohibición constitucional que el artículo 27 de la Carta Magna le establecía al Estado mexicano para celebrar contratos de explotación de hidrocarburos con particulares; mientras que el

segundo cambio fue encaminado a redactar en el artículo 28, que las actividades relacionadas con la exploración y extracción de hidrocarburos se podrían realizar en los términos dispuestos del artículo 27 constitucional.

Aun cuando la explotación de hidrocarburos fuese una actividad monopólica estatal, esta podría ser realizada por entes públicos y privados mediante la materialización de asignaciones o contratos vinculados al Estado mexicano. Transcurrido el proceso legislativo, la iniciativa de decreto de reforma se aprobó en los términos generales propuestos en la iniciativa, lo que hoy se traduce en la permisón constitucional que autoriza al Ejecutivo federal a suscribir contratos con particulares para efecto de realizar la explotación y extracción de los hidrocarburos nacionales.

En la actualidad, la planeación pública ha proyectado el desarrollo económico y social del Estado a partir de la explotación de los hidrocarburos. Esta administración gubernamental, al igual que la anterior, en lo sustancial, ha formulado un planteamiento público que busca inducir la equidad social del país a partir del aprovechamiento de los hidrocarburos. Desde la propuesta de programa de gobierno de la actual administración federal, se proyectó procurar el impulso a la explotación de los hidrocarburos con el objeto de fortalecer la soberanía energética del país. Condición que, de lograrse, deberá propiciar la igualdad social vinculada a la noción del bien común público.

De manera específica, la administración federal ha planteado un par de programas públicos en materia de energía petrolera: el Plan Nacional de Hidrocarburos y el Plan Nacional de Refinación, proyectos orientados a revitalizar la participación de la empresa productiva del Estado en las fases que componen la producción petrolera para alcanzar la autosuficiencia energética nacional, soberanía que disminuiría la disimilitud social. Con el primero de los programas públicos, el gobierno central pretende redireccionar la exploración y extracción de hidrocarburos -petróleo y gas- a proyectos de fácil acceso y, por tanto, de menor costo, como en tierra y en aguas someras; mientras que, con el segundo, el de refinación, busca rehabilitar y construir la infraestructura vinculada a la petroquímica.

Con estas acciones públicas, el gobierno pretende generar proyectos de exploración, extracción y refinación de hidrocarburos que permitan producir 2 400 000 barriles diarios de petróleo y el procesamiento de 240 mil barriles diarios de crudo, con el objeto de producir 170 mil barriles de gasolina y 120 mil barriles de diésel diarios, esto para abastecer la demanda nacional, reducir en un treinta por ciento la importación de gasolinas y originar una derrama económica que se vea reflejada en un mayor número de fuentes de empleo.

Mediante estas directivas, el gobierno federal busca provocar dinámicas económicas y sociales a partir de las actividades vinculadas al recurso natural energético, directivas que si bien se conjugan en distintas dimensiones, se concentran hacia un mismo curso: fortalecer la industria que se encuentra vinculada a los hidrocarburos con la finalidad de alcanzar la soberanía energética que propiciaría un crecimiento social y económico equilibrado, así como el logro del bien común.

La planeación pública en México ha depositado en la explotación de los hidrocarburos el impulso del desarrollo económico y social del país y sus regiones. Estas políticas públicas soportadas en el aprovechamiento energético son trazadas con el propósito de producir un beneficio general entre la nación, mediante el abasto adecuado de energía o el impulso de los sectores económicos afines regularmente constituidos por empresas de dimensiones nacionales, y también para generar un provecho territorial menos difuso en su implementación. Es decir, son proyectadas para generar un beneficio territorial más delimitado.

Sobre lo anterior, Alpízar et al. (2015) sostienen que las acciones públicas vinculadas al sector energético del país no solo tienen una implicación a nivel nacional para replantear las posibilidades de desarrollo generacional del país, sino también tienen implicaciones regionales que involucran políticas públicas que fomenten el empleo, el avance tecnológico y la inclusión social. Esta directiva hacia los gobiernos descentralizados responde en primera instancia al mandato constitucional que les ordena armonizar su gestión de gobierno al proyecto de nación federal, en aras de contribuir con sus acciones hacia los mismos objetivos, pero de igual modo, a la intención de incrementar sus oportunidades de asimilar la mayor derrama económica para sus territorios.

No obstante, los objetivos que podrían inscribirse en la dinámica de beneficios que acompañan a la industria de los hidrocarburos, y a la que se aspira acceder como una realidad efectiva entre los integrantes de las esferas sociales y económicas de los espacios locales y regionales donde se focalizan sus actividades, no es por mucho la única que sobreviene, incluso, no es siquiera la más palpable en esos espacios con el devenir del tiempo.

El presente capítulo introductorio refiere las sinergias más representativas de la industria de los hidrocarburos, enfocándose en los impactos adversos de la industria, así como el espacio geográfico en el que se observó su concurrencia con condiciones socioambientales que hacían propicio su análisis desde distintas áreas científicas, para identificar qué tan presentes eran sus efectos.

Lo que se pretende es esbozar el escenario socioambiental en el que se realizaron análisis con el propósito de valorar y diagnosticar, en el marco de procedimientos científicos de índole químico y biológico, las condiciones físicas

de los recursos hídricos y superficiales que están expuestos a las actividades de aprovechamiento de hidrocarburos; asimismo, formular una interpretación sociojurídica entre el vínculo que surge entre las actividades económicas de índole primario, los elementos abióticos vinculados a ellas y la explotación de los hidrocarburos (García, 2021).

II. Las sinergias de la industria petrolera y sus efectos más distintivos

La industria de hidrocarburos ha generado impresiones sobre las dimensiones y componentes de las sociedades nacionales, modificándolas y moldeándolas según los alcances y matices de su industria, así como por el tipo de objeto o dimensión de la colectividad estatal donde terminan incidiendo o reflejándose. La percepción más generalizada del petróleo, y por tanto más reconocida, es su impacto como fuerza económica, lo que le ha permitido adjudicarse una relevancia tanto financiera como política.

Barcón (2015), apunta que la modernidad que se ha originado alrededor del mundo con la industrialización siempre ha tenido una relación ineludible con la energía, lo que algunos países han aprovechado para impulsar su progreso económico (p. 344). Velázquez (2009) secunda lo anterior al sostener que, “sobre todas las fuentes conocidas, el petróleo se ha convertido en el recurso energético más importante de la sociedad actual y en el motor de toda la actividad industrial y económica moderna” (p. 236).

Mahajan y Singh (2015) resaltan la importancia de los hidrocarburos en la economía, al destacar su naturaleza de intercambio y su condición de factor multiplicador en las actividades productivas de la economía global. De acuerdo con ellos, el petróleo y sus derivados son productos que pueden comprarse, venderse o comercializarse en todo tipo de mercados, por ostentar el carácter de materia prima. Esta cualidad permite producir un sinfín de bienes de uso diario y de consumo: por ejemplo, productos alimenticios que son consumidos en la India, materiales para edificar casas en Europa o para fabricar automóviles en Estados Unidos, es decir, generan bienes para todo tipo de mercados y para toda clase de consumidores.

La Conferencia de las Naciones Unidas sobre Comercio Exterior y Desarrollo señala, sobre el papel de los hidrocarburos en el ámbito comercial internacional, que la calidad de factor multiplicador que posee el petróleo le otorga una calidad de bien de comercialización global y, por tanto, una “importancia vital para los países en desarrollo, principalmente los menos desarrollados”. En esta misma conferencia destacaron que, entre los 141 países que se encuentran en vías de desarrollo, las exportaciones de hidrocarburos representaron casi el 50 % de sus ingresos, motivo

por el que el petróleo es considerado “como un recurso de valor estratégico para la gran mayoría de los países del orbe”. Las cifras presentadas por el Banco Interamericano de Desarrollo ofrecen un panorama aún más claro sobre el petróleo y su industria. De acuerdo con la organización, el aspecto de mayor relevancia es el relacionado con el abastecimiento de energía, ya que con los productos derivados de su refinación -gasolina, diésel, gas, turbosina, etcétera- provee el 41 % de la energía que se consume en el mundo. El petróleo ha sido el “elemento esencial de la economía mundial por casi todo el siglo XX y lo que va del siglo XXI”. El Banco Interamericano de Desarrollo destaca que los productos obtenidos del petróleo son decisivos para propiciar el flujo de las cadenas productivas que sostienen a otros sectores de la economía, bienes que, al igual que los suministradores de energía, son de consumo cotidiano y de carácter indispensable. Por último, el organismo bancario generó un análisis macroeconómico que le permitió referir a los hidrocarburos “como uno de los principales pilares que sostienen a la economía moderna”. Según los cálculos de esta institución financiera, la última baja significativa del precio del petróleo representó una tasa de crecimiento económico a nivel mundial del 0.16 y al 0.37 puntos porcentuales. Es la magnitud de estas cifras por las que el organismo considera que no existe ningún otro recurso energético equiparable, en influencia y relevancia económica global como el petróleo (Sucre, 2016, pp. 1-3).

Estos aspectos, que describen la impresión más reconocida del recurso natural fósil y su industria, son los más perceptibles en las sociedades estatales, en virtud de que se hacen más patentes las manifestaciones de sus impactos, tanto el de suministro de energía como el de provisión de materia prima, particularmente en aquellas naciones que están en proceso de desarrollo y son productoras de hidrocarburos. En efecto, las perspectivas económicas más singulares de los hidrocarburos se aprecian con mayor claridad en cada ente estatal por la aportación material que manifiestan en la consolidación de su ámbito económico, tanto el público como el social y privado. Este aporte se hace perceptible con la edificación de infraestructura -carreteras, puertos, urbanización, etcétera-; la generación de fuentes de empleos directos e indirectos; el mayor flujo de ingresos públicos como resultado de su venta al extranjero o de su imposición tributaria; la estimulación de la industria nacional y regional asociada a la industria por algún bien o servicio; desarrollo e impulso a la innovación tecnológica vinculada a su aprovechamiento y, por supuesto, la invaluable oportunidad de ser una nación energéticamente soberana (García, 2015).

México ejemplifica esta importancia de los hidrocarburos en sus diversas dimensiones y elementos por los matices que proceden de su industria. Sin duda, los efectos de índole económico a partir del aprovechamiento de los hidrocarburos

impactaron de forma favorable los procesos económicos de los sectores productivos del país; las finanzas públicas de sus distintos ámbitos gubernamentales y, por supuesto, la autonomía energética nacional, lo que se vio reflejado en el trayecto económico contemporáneo de México en crecimiento, progreso y consolidación como nación. Aguilera (2015) destaca que la industria mexicana de los hidrocarburos ha sido un catalizador de la cadena de valor económico nacional; primero, en sus inicios, mediante la extracción de crudo, la modernización de las refinerías y el tendido de ductos por gran parte del territorio nacional; y posteriormente, mediante la incursión de la industria nacional en la petroquímica.

Puyana (2015) expone la relevancia del sector energético en la economía de México. La aportación real de los hidrocarburos a la economía nacional sobrepasa el valor obtenido bajo el análisis que comúnmente se aplica para determinarlo, el relativo a las sumas del numerario generado por las exportaciones de petróleo o por la recaudación fiscal. La contribución de la industria petrolera debe medirse con base en “la bonanza de precios aplicada a la bonanza de cantidades”. Empleando como ejemplo al yacimiento de Cantarell, “la producción entre 1960-1973, multiplicada por la ganancia en los precios representó 634 mil millones de dólares corrientes o 779 mil millones de dólares de 2011, para un promedio anual de 16 y 20 mil millones de dólares corrientes y constantes anuales, respectivamente, de lo cual se desprende que estas bonanzas representaron el 4.5 PIB anual en promedio” (pp. 39-41).

La impresión más reconocida del petróleo se refleja en la dimensión económica de la sociedad moderna, donde impulsa tanto la economía global como la producción doméstica mediante la energía producida por su combustión y a la practicidad para transformarse en diversos bienes, mismas que le han permitido moldear la noción de modernidad y, sobre todo, para situarse como uno de los recursos más importantes para las naciones.

No obstante, a la par existe otra dinámica que también se propicia con la explotación de los hidrocarburos y que goza de la misma capacidad para incidir en las dimensiones de las sociedades: los impactos de carácter lesivo lo suficientemente perjudiciales para actuar en detrimento de elementos naturales que se encuentran protegidos por los derechos humanos, por ejemplo, la degradación de los principales recursos abióticos de la naturaleza: aire, agua y tierra, que son factores indispensables para la supervivencia y el desarrollo humano (García, 2015).

El suelo es bastante propenso a recibir los impactos adversos de la industria petrolera. Pons et al. (2011) señalan que los hidrocarburos contienen contaminantes orgánicos como alcanos, cicloalcanos y aromáticos; compuestos polares como azufrados y organosulfurados constituidos con nitrógeno, asfáltenos y elementos metálicos como el vanadio y níquel, componentes que ocasionan impactos nocivos en

la tierra (p. 2). El Instituto Argentino del Petróleo (1991) indica que, como resultado de la manipulación de los hidrocarburos en tierra por motivo de su extracción, traslado o industrialización, los elementos de su composición se esparcen hacia el entorno causando en el suelo una alta presencia de sus componentes contaminantes en sus primeras capas.

Cavazos (2014) respalda lo anterior cuando apunta que la polución del suelo por hidrocarburos afecta la flora, fauna y microorganismos del suelo; la fertilidad de los suelos; el crecimiento de las plantas y la existencia y sobrevivencia de los animales que se alimentan de estas; contaminación que se origina por las operaciones cotidianas de la industria de los hidrocarburos en tierra y que se presenta en zonas rurales donde se practica la agricultura.

Los impactos propiciados por la industria de los hidrocarburos en suelos destinados a la actividad agrícola tienden a extender sus efectos hacia otros componentes y esferas. La contaminación generada en suelos destinados para la agricultura permite distinguir que la impresión adversa de los hidrocarburos se expande y trasciende a bienes y valores tutelados por los derechos fundamentales.

De acuerdo con Cavazos (2014), los daños ocasionados por los hidrocarburos en superficie se dividen en ecológicos y patrimoniales. Los primeros corresponden a la degradación ocasionada en los medios abióticos. Los daños patrimoniales, por su parte, aluden a la pérdida o menoscabo que se ocasiona sobre bienes materiales o tangibles que poseen los miembros de las colectividades en sus distintas expresiones: cultivos, cosechas, extensiones de tierras, sistemas de riego propicios para el desarrollo de la agricultura y caminos vecinales, cuestión que origina una afectación en la que se involucran los sistemas de producción y la economía local. Señala Cavazos (2014) que en los últimos veinte años la industria de los hidrocarburos ha provocado, sólo en México, pérdidas al sector de la agricultura por más de cincuenta mil millones de dólares.

El recurso hídrico es especialmente vulnerable a la contaminación producida por la industria de los hidrocarburos. Ortuño (2019) señala que las operaciones de transporte y almacenamiento de hidrocarburos produce efectos adversos sobre la integridad física, química y biológica de los recursos abióticos que conforman las reservas naturales más importantes de la biósfera terrestre, entre ellos, evidentemente el recurso hídrico. Una de las repercusiones ambientales de la explotación intensiva de los yacimientos petrolíferos es la dispersión de contaminantes durante el transporte de hidrocarburos a través de oleoductos y gasoductos. Estas operaciones acrecientan los riesgos de afectación en los recursos naturales cercanos a las instalaciones (p. 173).

Fontaine (2003) indica algunos de los efectos de los procesos de explotación que producen impactos lesivos sobre el agua y consecuentemente sobre el entorno social y ecológico. Describe, por ejemplo, la serie de actividades operativas que están implícitas en la perforación de pozos destinados para la extracción de hidrocarburos y los contaminantes que se originan como resultado de su práctica, así como las afectaciones en los ecosistemas sociales y ambientales que precisan de este recurso natural para subsistir. Los pozos generan lodos tóxicos y desechos sólidos que no son biodegradables y que se almacenan en sitios cercanos. Subsecuentemente, en la fase de bombeo para extraer el hidrocarburo del subsuelo, el proceso separa el agua y el gas natural del producto petrolífero más pesado, operación que evacúa diariamente cientos de barriles de agua mezclada con químicos, sales tóxicas y residuos de hidrocarburos hacia piscinas expuestas al aire libre. A estas tareas se suman las operaciones de mantenimiento aplicadas a los sistemas de oleoductos y estaciones de producción que sirven para transportar y almacenar los hidrocarburos extraídos, las cuales aportan pasivos ambientales a los entornos que se encuentran cercanos a ellos.

Como ejemplo, Fontaine (2003) refiere la serie de afectaciones socioambientales que se originaron por causa del aprovechamiento de hidrocarburos que se realizaba en el área de explotación “Campo Gacela” en Orellana, Ecuador. De acuerdo con la información presentada por Fontaine (2003), las instalaciones de descarga, los tanques de agua residuales y las piscinas de desecho de crudo habían desbordado o filtrado agentes contaminantes que habían transformado los pastos en hierba amarilla y seca por causa de la acidez que le impregnaban al suelo y a los esteros; las estaciones de producción, por su parte, habían afectado las actividades de agricultura y ganadería por la polución que generaban sus lodos y desechos tóxicos no biodegradables en el suelo y agua de la zona. Por último, el río que irrigaba las fincas de la zona había sido contaminado por causa del derrame de aguas de formación, ocasionándole a la fauna marina un daño irreversible.

González (2015) indica que la décima parte del agua que se emplea como disolvente en los procesos industriales asociados a la explotación de hidrocarburos propenden a situarse como un factor contaminante a corto, mediano y largo plazo, dado que esta asimila cualidades tóxicas y asume atributos de persistencia, esto es, que su degradación en el medioambiente puede implicar meses o incluso años. Por ello, este tipo de residuo industrial es una amenaza para la seguridad hídrica de los ecosistemas y las personas.

La industria de los hidrocarburos genera una impresión diversa a la económica sobre las dimensiones de las sociedades nacionales, la cual está constituida por degradaciones en aspectos diversos que lesionan la noción de vida digna, de los

bienes y los valores jurídicos resguardados por los derechos humanos. Ciertamente, junto a la impresión de la industria de los hidrocarburos que potencia un estado general de bienestar social y prosperidad pública, también surge otra impresión que estampa efectos opuestos que actúan en detrimento de aquellos bienes y valores que deben obtenerse, conservarse y ejercerse para alcanzar un grado adecuado de vida digna (García, 2021).

III. San Fernando, Tamaulipas: entre la agricultura y la industria petrolera

El municipio de San Fernando se ubica en la planicie de Tamaulipas denominada Valle de San Fernando, su extensión superficial se extiende a través del área de los sistemas hidrológicos de los ríos Conchos o San Fernando y del arroyo de Chorreras que abarca los municipios de San Fernando y Méndez y parte de los municipios de Burgos y Cruillas. De acuerdo con el *Anuario Estadístico de Tamaulipas 2017*, en el 2015 en el municipio de San Fernando habitaban 55 821 personas: 27 790 hombres y 28 191 mujeres (INEGI, 2017).

La fisiografía del municipio consiste, en cuanto a la provincia: llanura costera del golfo norte (79 %), cuerpo de agua (16 %) y grandes llanuras de Norteamérica (5 %); en cuanto hace a su subprovincia fisiográfica: llanura costera tamaulipeca (77 %), cuerpo de agua (16 %), llanuras de Coahuila y Nuevo León (5 %) y llanuras y lomeríos (2 %); y finalmente, su sistema de toposformas se conforma de: llanura aluvial con lomerío (29 %), llanura aluvial (18 %), llanura aluvial inundable y salina (18 %), cuerpo de agua (16 %), llanura aluvial inundable (6 %), lomerío de laderas tendidas con llanuras (5 %), llanura aluvial con lomerío de piso rocoso o cementado (4%), lomerío con llanuras (2 %) y playa o barras (2 %).

En cuanto su hidrografía, el municipio de San Fernando pertenece a la Región Hidrográfica: San Fernando-Soto la Marina (100 %); a la cuenca de la Laguna Madre (83 %) y del río San Fernando (17 %); a la subcuenca de la Laguna Madre (83 %) y del río Conchos (13 %) y los arroyos Chorreras (3.9 %) y La Misión (0.1 %); sus cuerpos de agua son las lagunas: Anda la Piedra, Honda, La Nacha, La Paloma, La Playa, Blanca, Madre, Seca, Plan Salado y estero La Resaca, El clima del municipio es semicálido subhúmedo con lluvias escasas todo el año (77 %) y semiseco muy cálido y cálido (23 %), su rango de temperatura es de 20 - 24°C y su rango de precipitación es de 500 - 800 mm al año. El uso del suelo es: agricultura (52 %); cuerpo de agua (16 %) y zona urbana (0.5 %); y su vegetación se distribuye en: matorral (29.5 %), pastizal (1 %) y selva (1 %) (INEGI, 2009).

Estas características, en su conjunto, propician que la principal actividad económica sea la agricultura; de hecho, el uso potencial del suelo del municipio de

San Fernando gira en torno a la agricultura mecanizada continua (71.7 %), donde el sorgo, maíz y algodón son los principales cultivos. Estas condiciones también propician las actividades primarias relacionadas con la ganadería, avicultura y pesca (SAGARPA, 2016).

Por la ubicación geográfica de San Fernando, en su territorio convergen las carreteras provenientes de los municipios fronterizos de Matamoros y Reynosa, así como del municipio costero de Soto La Marina, circunstancia que lo sitúa como paso obligado para transitar hacia la frontera norte del estado y como el municipio con mayor densidad de población de la región del Valle y el más importante de los cuatro que la conforman (INAFED, 2011).

El municipio está posicionado como el de mayor producción de sorgo a nivel estatal y nacional, lo que representa para sus pobladores la actividad base de su desarrollo social y económico. Lugar al que ha accedido como resultado de la actividad agrícola que despliegan 33 880 productores sobre una superficie aproximada de 210 000 hectáreas,¹ y a las condiciones ecosistémicas que se presentan en torno de ese espacio territorial en los que los recursos hídricos locales y regionales contribuyen de modo preponderante.

San Fernando presenta a lo largo de su territorio elementos de naturaleza hídrica de alta relevancia ambiental, de los cuales dependen los procesos ecosistémicos, sociales y económicos. Sobre su superficie, además del río San Fernando que fluye a lo largo de su territorio, se sitúan las lagunas de San Juan, San Isidro, La Nacha y Seca; y los humedales de la Laguna Madre; mientras que en su subsuelo se encuentra el acuífero Méndez-San Fernando del que se extrae agua para el abastecimiento de las comunidades rurales y la población urbana; asimismo, se encuentra la Laguna Madre, cuerpo hídrico que se decretó área natural protegida en el 2005.

Para el gobierno federal era imperativo renovar el sector energético de los hidrocarburos desde las estructuras más esenciales que soportaban su administración estatal, la jurídica y la gubernamental, ya que, si el objetivo era incrementar la producción de hidrocarburos con el fin de asegurar el suministro energético a costos accesibles, la generación de proyectos asociados a la cadena de valor de la industria era estratégico.

Este enfoque público que habría de modificar el paradigma constitucional que había imperado en las últimas décadas, en términos prácticos se traduciría en ciento once contratos de exploración y extracción. Ciento seis contratos corresponderían a adjudicaciones vía proceso de licitación y los restantes a asignaciones otorgadas a empresas productivas del estado. Asimismo, cincuenta y

¹ Datos obtenidos del *Anuario Pecuario, Agrícola y Forestal del Estado de Tamaulipas*.

seis de esos contratos adjudicarían áreas contractuales terrestre; mientras que el resto otorgarían áreas en medio marino: treinta y dos en aguas someras y veintiocho en aguas profundas. Por último, se otorgarían trescientas noventa y seis asignaciones a PEMEX, lo mismo para exploración que para extracción en áreas terrestres y marinas (Secretaría de Energía, 2021).

En 2020, el municipio de San Fernando presentó actividades asociadas a la explotación de hidrocarburos en distintos puntos de su demarcación territorial. Al centro-norte, las actividades de hidrocarburos se realizan con base en las asignaciones A-0234-M-Campo Nejo, de una extensión superficial de 127.02 km² y la A-0155-M-Campo Huizache, de una extensión superficial de 28.02 km² (Figura 1); mientras que al sur se efectúan otras con base en el contrato CNH-R02-L02-A8.BG/2017, de una extensión superficial de 416 km² y una vigencia contractual de treinta años. Áreas de aprovechamiento de las que son responsables PEMEX, Pantera Exploración y Producción 2.2, S.A.P.I. de C.V, Sun God Energía de México, S.A. de C.V., Jaguar Exploración y Producción de Hidrocarburos, S.A.P.I. de C.V e Iberoamericana de Hidrocarburos S.A. de C.V (Comisión Nacional de Hidrocarburos, 2020). Estas áreas, para 2020 habían generado alrededor de 1 450 pozos de extracción de gas condensado, húmedo, natural y seco, entre otros derivados del petróleo (Secretaría de Energía, 2016). De los cuales, 208 se encontraban operando de modo activo y el resto, 1 243 pozos, se encontraban taponeados y con posibilidades de ser reactivados por medio de técnicas de explotación que permiten extraer el resto de recurso natural almacenado con baja presión en su interior; en tanto arriban nuevas técnicas de explotación para ese tipo de pozos.

En suma, el territorio de San Fernando presenta infraestructura relacionada con el desarrollo de esas actividades de aprovechamiento en 4 estaciones de recolección denominadas Nejo 1, Nejo 2, Nejo 3 y Huizache 1; tres gasoductos para el traslado de petrolíferos extraídos: un gasoducto denominado La Ermita-Altamira, perteneciente al Sistema de Transporte de Gas (SISTRAGAS); un gasoducto, Matamoros-Tuxpan, situado frente a sus costas; y un gasoducto más denominado Huizache 1-Entronque Nutria, ubicado al norte de su territorio.

La estrecha relación entre San Fernando y la industria de los hidrocarburos deriva como consecuencia de su ubicación geográfica, debido a que está ubicado sobre la cuenca productora de hidrocarburos que se extiende entre los estados de Tamaulipas y Nuevo León y hacia la plataforma continental del golfo de México, denominada Provincia Geológica de Burgos. Cuenca petrolífera de una superficie aproximada de 73 800 km² que se extiende a lo largo de 650 km de largo (Secretaría de Energía, 2016).

El escenario que se configura en San Fernando es propenso a la gestación de problemáticas asociadas a la contaminación de los recursos naturales del suelo y agua por residuos contaminantes derivados de la actividad petrolera, ya que las actividades asociadas al aprovechamiento de los hidrocarburos propician un deterioro en los ecosistemas por las aguas congénitas que produce, la deforestación y los residuos contaminantes que esparce.

Esas problemáticas ambientales bajo el contexto social y económico del municipio se agudizan debido a que los recursos abióticos representan los medios más importantes para la subsistencia de un grupo importante de sus pobladores, quienes dependen de forma directa de su aprovechamiento por medio del cultivo del sorgo, o de forma indirecta a través del comercio local del área urbana y de los ejidos en el medio rural.

IV. Las condiciones de San Fernando desde la óptica de los derechos fundamentales

La industria de los hidrocarburos puede acarrear diversos beneficios para la nación, el gobierno y la sociedad: ya sea porque impulsa la creación de infraestructura para la industria o porque representa oportunidades para la sociedad -empleos directos o indirectos y un mayor flujo de ingresos públicos derivados de su venta a otros Estados o de su imposición tributaria.

Sin embargo, existen efectos adversos en el contexto social y público de los gobiernos locales. Esta dualidad se aprecia cuando, a la par de recibir un conjunto de efectos positivos en las regiones por el flujo de infraestructura y de negocios complementarios a las actividades del aprovechamiento de los hidrocarburos, también se presentan condiciones agravantes en el bienestar de los pobladores que residen en las regiones donde se asientan sus actividades operativas, bienestar humano integrado al sistema jurídico mexicano y los derechos humanos (Cárdenas, 2015). A la par del posible desarrollo social originado por la explotación de los hidrocarburos, también se puede presentar un retroceso social debido a la nueva dinámica.

El bienestar al que se hace referencia es el que se desenvuelve dentro del valor de la dignidad humana, instrumentada a través de los derechos fundamentales, tanto individuales como colectivos, constitucionalmente reconocidos (Muñoz y Acuña, 2001), cuya finalidad es la de materializar la dignidad individual y social del ser humano, englobando los conceptos del bien común e individual.

Ahora bien, una de las primeras confluencias que se presenta entre los efectos adversos de la explotación de hidrocarburos, es el incremento de la presión ambiental y deterioro de los elementos abióticos de los ecosistemas que reciben la

presencia de la industria. Con el aumento sustancial de actividades asociadas a la explotación de hidrocarburos, la generación de pasivos ambientales experimenta cierta potenciación en los elementos abióticos de los ecosistemas locales, como el suelo que resiente las actividades asociadas a la extracción de hidrocarburos, lo que en consecuencia trasciende de modo negativo en los lineamientos base de protección, prevención y preservación que fija el derecho fundamental a un medioambiente sano que se encuentra instaurado en el párrafo quinto del artículo 4° de la Constitución mexicana.

El derecho humano al medioambiente sano ha sido consagrado en las normas constitucionales como un derecho esencial para el ser humano, por su calidad y cualidad vital para el desenvolvimiento humano digno presente y futuro, en virtud de que el concepto de vida va más allá de lo estrictamente biológico, es más amplio, puesto que, al participar el valor de la dignidad, se crea una dimensión existencial más plena, donde la calidad del medioambiente actúa como un elemento fundamental para su desarrollo.

La Suprema Corte de Justicia de la Nación (SCJN, 2015), por su parte, indica que el alcance jurídico de este derecho esencial estriba en procurar la calidad del ambiente mediante el aminoramiento del impacto ambiental causado por agentes contaminantes, ya que con ello se brinda a los miembros de la sociedad el medioambiente sano y adecuado que se requiere para proporcionar los satisfactores de salud, capacidad reproductiva y calidad de vida en general, lo cual es de interés y fin social para el Estado y los ámbitos de gobierno que lo conforman. De acuerdo con el órgano jurisdiccional supremo, la salvaguarda del derecho fundamental a un medioambiente sano constituye una obligación que debe ser planteada como un objetivo legítimo del Estado, a fin de que todas las personas gocen de un medioambiente que les permita su desarrollo y bienestar humano

Otra de las convergencias en materia de derechos humanos que se presenta entre la sinergia de los efectos adversos de la explotación de hidrocarburos y las condiciones socioambientales del municipio de San Fernando, es la relacionada con el bien jurídico tutelado del agua. Las principales actividades económicas de la población de San Fernando son las de producción agrícola; esto quiere decir, que es un municipio que sostiene su economía en las actividades agropecuarias y los demás sectores productivos (CNA, 2014).

Fontaine (2003) señala que la intensificación de escenarios socioambientales adversos se propaga en donde se instala la industria petrolera. Las vicisitudes derivadas de su práctica conforman condicionantes adversas que actúan en detrimento de los bienes y derechos protegidos bajo el velo de los derechos fundamentales.

Así es, el incremento de actividades extractivas genera, al igual que en el suelo, mayores posibilidades de una afectación en las condiciones físicas y químicas del recurso hídrico de tipo contaminante. Simental (2016) apunta que el enunciado en el que se asevera *el agua es vida*, “es reconocido por la ciencia como un axioma, ya que sin este recurso la vida sería prácticamente inconcebible. Y con ello queda claramente demostrada la relación entre la vida y el agua” (p. 60).

En relación con esa condición de vitalidad que el agua tiene para el ser humano y el reconocimiento que de él hace el derecho constitucional, la SCJN (2015) esgrime que este derecho fundamental estriba en garantizar el acceso a las personas al vital líquido de manera suficiente, salubre, aceptable y asequible para su uso personal y doméstico, así como para el desarrollo del sector productivo primario, pues guarda una inminente vinculación con el derecho fundamental a una alimentación nutritiva, suficiente y de calidad.

La actividad de explotación de hidrocarburos irá en ascenso conforme se vayan atendiendo los planes de trabajo para su extracción con miras a cubrir los requerimientos nacionales del recurso energético, lo que originará una mayor presión ambiental en elementos abióticos como el suelo y el agua de las áreas de cultivo y asentamientos humanos cercanos a estas y, con ello, las probabilidades de riesgos de contaminación. Los pronósticos y las realidades experimentados en esa región permiten considerar que el goce y ejercicio adecuado de los derechos fundamentales al medioambiente y al agua, en relación directa con la actividad económica de la agricultura que se practica y el entorno socioambiental donde se desenvuelven cotidianamente los habitantes de San Fernando, se encuentran en riesgo de verse alterados por la presencia de la industria.

La actividad de aprovechamiento de los hidrocarburos no solo origina una dinámica que propicia condiciones favorables, sino también condiciones adversas en los entornos sociales. Es decir, si bien la explotación de hidrocarburos goza de la cualidad para potenciar el progreso social mediante un impulso al desarrollo económico, también lo es que dispone del atributo para desarrollar un retroceso social. Esta confluencia entre la industria, espacios socioambientales y derechos humanos se pone de manifiesto en las estructuras normativas que se diseñan con el propósito de evitar o mitigar sus impactos en las localidades donde se configuran estos escenarios con motivo del aprovechamiento del recurso energético. La Ley de Ingresos sobre Hidrocarburos, de 11 de agosto de 2014, es un buen ejemplo de lo anterior, ya que en su contenido normativo se aprecian figuras legales para atender al impacto negativo asociado al medioambiente y los recursos naturales. Esta legislación decreta la creación de un fideicomiso público que debe estar constituido para provecho de los entes de gobierno regionales y locales que presentan en su

competencia territorial producción de hidrocarburos, concebido para orientar su patrimonio hacia acciones que mitiguen el impacto desfavorable de la industria sobre el entorno ambiental.

De acuerdo con la literalidad regulatoria de su artículo 57, fracción IV, el ámbito gubernamental competente debe crear el caudal público denominado: “Fondo para las Entidades Federativas y Municipios Productores de Hidrocarburos”, que debe ser capitalizado mediante los ingresos causados por la contribución aplicada a la actividad de exploración y extracción de hidrocarburos; asimismo, y de acuerdo con las reglas que se estructuraron para operarlo, el recurso pecuniario recaudado debe ser aplicado para subvencionar proyectos de infraestructura que auxilien a resarcir el deterioro ambiental ocasionado por los efectos adversos que acompañan a las actividades y proceso de exploración y extracción de hidrocarburos.

En efecto, las reglas de operación describen los tipos de obra para los que deben ser empleados, las cuales, por su naturaleza y orden de prelación, obedecen al propósito de neutralizar, en la medida de lo posible, el efecto nocivo producido por el aprovechamiento de los hidrocarburos que se considera impactara en el ecosistema adyacente a las áreas de explotación. La norma Décima Cuarta del Acuerdo por el que se emiten las Reglas de Operación para la distribución y aplicación de los recursos del Fondo para Entidades Federativas y Municipios Productores de Hidrocarburos, del 4 de junio de 2015, enlista las obras en las que pueden ser aplicados los recursos del fondo, ya que giran en torno a resarcir los impactos adversos de la industria de los hidrocarburos.

También se han emitido reglas aplicables a los procesos relacionados con el aprovechamiento de los hidrocarburos y sus impactos perniciosos en los recursos naturales, como la NOM-052-SEMARNAT-2005 (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, 23 de junio de 2006), que clasifica los residuos peligrosos y la NOM-001-ASEA-2018 (Agencia Nacional de Seguridad Industrial y de Protección al Medio Ambiente del Sector Hidrocarburos -ANSIPMASH-, 21 de noviembre de 2018) y la NOM-009-ASEA-2017, Administración de la integridad de ductos de recolección, transporte y distribución de hidrocarburos, petrolíferos y petroquímicos (ANSIPMASH, 21 de enero de 2019), que destaca los incidentes que pueden suscitarse en las áreas o “círculos de impacto potencial” donde se realiza el aprovechamiento de hidrocarburos.

Además, las disposiciones administrativas de carácter general establecen los lineamientos para informar la ocurrencia de incidentes y accidentes a la ANSIPMASH ([2016], 4 de noviembre), cuyo contenido clasifica a los residuos producidos por la manipulación de hidrocarburos como peligrosos, es decir, como elementos que poseen características de corrosividad, reactividad, explosividad, toxicidad o inflamabilidad,

por lo que pueden provocar decesos, lesiones graves, daños estructurales severos y demás afectaciones de índole individual, colectivo, civil o ambiental.

El sentido regulatorio de las normas y reglas está orientado a mitigar o prevenir las condiciones adversas que la industria de los hidrocarburos propicia en los entornos ambientales y sociales donde tiene presencia operativa. Es decir, buscan atender escenarios tales como los que se presentan en San Fernando, cuyo contexto territorial está plagado de elementos ambientales, sociales y económicos que además de estar estrechamente relacionados entre sí, acogen a la industria de los hidrocarburos y sus dinámicas.

V. Consideraciones finales

Ante las evidencias presentadas, nace el requerimiento de valorar y diagnosticar de forma inicial, y en el marco de procedimientos científicos de índole químico y biológico, las condiciones físicas de los recursos hídricos y superficiales del municipio de San Fernando que están expuestos a las actividades de aprovechamiento de hidrocarburos; así como formular una interpretación de carácter sociojurídico que ofrezca una primera aproximación entre las actividades económicas del cultivo del sorgo y la explotación de los hidrocarburos.

Este escenario requiere de la intervención de diversas áreas, metodologías y perfiles científicos para su análisis y, en su caso, posteriores propuestas de medidas de prevención, mitigación o solución, ya que este tipo de fenómenos, que involucran la interacción entre elementos y condiciones sociales, económicas y, sobre todo, ambientales, invitan a emprender su análisis y estudio desde diversas ópticas científicas. Es decir, estas condiciones requieren ser evaluadas y diagnosticadas en primera instancia bajo metodologías físicas, químicas y biológicas que permitan delimitar objetivamente la magnitud de cada fenómeno y sus alcances reales, para posteriormente canalizar sus resultados a una interpretación sociojurídica que pueda servir de base científica en la formulación de políticas e instrumentos públicos concretos, tanto regionales como locales, que contribuyan a su atención y mitigación en el marco de los lineamientos públicos y normativos conducentes.

En definitiva, los procesos sociales, económicos y ambientales que se ven involucrados por causa de coyunturas geográficas, naturales y políticas, como acontece en el caso del fenómeno socioambiental que se ha configurado en San Fernando, requieren de un examen científico a partir de esa misma heterogeneidad, pues ello facilita teorizar, diagnosticar y construir propuestas de desarrollo integral y sustentable que sirvan como base de discusión de las comunidades involucradas, directa e indirectamente, y de los organismos políticos competentes de la región y el país (Rincón et al., 2015, p. 21).

Referencias

- Aguilera, M. (2015). *El petróleo mexicano: conflicto, esperanza y frustración*. Miguel Ángel Porrúa-UNAM.
- Alpizar, V. R., Lara, O. y Uribe, A. (2015). El consorcio o la asociación industrial como una estrategia de oportunidad de la industria nacional dentro de la reforma energética del país. En A. Oropeza. (Ed.), *Reforma energética y desarrollo industrial. Un compromiso inaplazable* (pp. 223-234). UNAM. Instituto de Investigaciones Jurídicas.
- Barcón, S. (2015). ¿Energía o anarquía en materia energética? Cómo aprovechar la reforma energética en materia industrial. En A. Oropeza. (Ed.), *Reforma energética y desarrollo industrial, Un compromiso inaplazable* (pp. 341-349). UNAM. Instituto de Investigaciones Jurídicas.
- Carmona, M. C. (2016). *La Constitución y los derechos ambientales*. Universidad Nacional Autónoma de México.
- Cavazos, J. (2014). *Afectaciones y consecuencias de los derrames de hidrocarburos en suelos agrícolas de Acatzingo, Puebla, México*. Agricultura, Sociedad y Desarrollo, UPAEP.
- Comisión Nacional del Agua. (2014). *Atlas del Agua en México*.
- Comisión Nacional de Hidrocarburos. (2016). *Atlas Geológico Recursos No Convencionales (Lutita Gas/Aceite)*.
- Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos. [Const]. Artículos 27 y 28. 5 de febrero de 1917 (México).
- Fensterseifer, T. (2008). *Direitos fundamentais e protecao do ambiente. A dimensao ecológica da dignidadehumana no marco juridico-constitucional do Estado Socioambiental de Direito*. Livraria do Advogado.
- Fontaine, G. (2003). *El precio del petróleo: Conflictos socio-ambientales y gobernabilidad en la Región Amazónica, Quito*. FLACSO-IFEA.
- García, E. A. (2015). La renovada regulación de los hidrocarburos nacionales. *Cuestiones Constitucionales. Revista Mexicana de Derecho Constitucional*, 1(33), 53-79. <https://revistas.juridicas.unam.mx/index.php/cuestiones-constitucionales/article/view/6097/8038>
- _____. (2021). Ocupación superficial en materia de hidrocarburos. El agravamiento de la vulnerabilidad jurídica del sector rural a partir del marco legal para su aprovechamiento. En M. Anglés y M. Palomino. (Eds.), *El desarrollo energético en México a la luz de los derechos humanos* (pp. 139-161). UNAM-IIJ.
- _____. (2021). Agua e hidrocarburos: Un acercamiento a su interacción bajo el enfoque del derecho humano al agua. *Cuestiones Constitucionales. Revista Mexicana de Derecho Constitucional*, 1(45), 107-147.
- _____. (2021). *Determinación y formulación del perfil nutrimental y contaminante del suelo y agua que concurren con las actividades de la industria de los hidrocarburos para su valoración fisicoquímica,*

- biológica, ecosistémica y socio-jurídica inicial. Capítulo San Fernando* [Protocolo de Proyecto de Investigación]. Universidad Autónoma de Tamaulipas
- Gobierno de México. (2024). *Asignaciones*. Secretaría de Energía. <https://asignaciones.energia.gob.mx/>
- _____. (2024). *Bóveda Digital de Contratos de la CNH*. Comisión Nacional de Hidrocarburos. <https://www.gob.mx/cnh/articulos/boveda-digital>
- _____. (2024). *Rondas México*. Portal web de la Comisión Nacional de Hidrocarburos. <https://rondasmexico.gob.mx>
- González, J. (2015). *El acceso al agua potable como derecho humano. Su dimensión internacional*. Alicante, Editorial Club Universitario.
- Instituto Argentino del Petróleo. (1991). *Guía de recomendaciones para proteger el medio ambiente durante el desarrollo de la exploración y explotación de hidrocarburos*.
- INEGI. (2009). *Prontuario de información geográfica municipal de los Estados Unidos Mexicanos, San Fernando, Tamaulipas*.
- _____. (2017). *Anuario Estadístico y Geográfico de Tamaulipas*.
- _____. (2024). *Cuéntame de México. Territorio. Agua potable y drenaje*. <http://cuentame.inegi.org.mx/territorio/agua/dispon.aspx?tema=T>
- Mahajan, N. y Singh, K. (2015). *A beginner's guide to Indian Commodity Futures Markets*. Madhyam.
- Muñoz, V. y Acuña, M. (2001). *Nuestra Constitución. Historia y valores de una nación*. Fondo de Cultura Económica.
- Ortuño, S. (2009). *El mundo del petróleo. Origen, usos y escenarios*. Fondo de Cultura Económica.
- Pons, M., Guerrero, A., Zavala, J. y Alarcón, A. (2011). Extracción de hidrocarburos y compuestos derivados del petróleo en suelos con características físicas y químicas diferentes. *Revista Universidad y Ciencia*, 27(1), 1-15.
- Puyana, A. (2015). Cantarell: Una bonanza de magnitud global. Su disposición en una economía abierta (México 1980-2012). En A. Oropeza. (Ed.), *Reforma energética y desarrollo industrial. Un compromiso inaplazable* (pp. 35-48). UNAM-IIJ-IDIC.
- Rincón, E., Rincón, J. y Castillo, R. (2015). Trayectoria académica del Centro Socioeconómico del Petróleo y Energías Alternativas de la Universidad del Zulia: Hacia un modelo de gestión de la investigación universitaria. *Revista Omnia*, 21(2), 11-35. <https://www.redalyc.org/pdf/737/73743366002.pdf>
- Secretaría de Gobernación. (2011). *Enciclopedia de los Municipios de México*. Instituto Nacional para el Federalismo y Desarrollo Municipal.
- Suprema Corte de Justicia de la Nación. (2015). *Semanario Judicial de la Federación y su Gaceta*. <https://www.scjn.gob.mx/publicaciones-de-la-suprema-corte-de-justicia-de-la-nacion/gaceta/detalle/21/2015-08-01>
- Sucre, C. (2016). *La ley y los hidrocarburos: comparación de marcos legales en América Latina y el Caribe*. Banco Interamericano de Desarrollo.

- Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación. (2016). *Tamaulipas. Infografía Agroalimentaria*.
- Velázquez, J. C. (2009). El nuevo derecho internacional de la energía a través del estudio de sus fuentes y el ordenamiento del mercado mundial del petróleo en un contexto geopolítico-especulativo. *Anuario Mexicano de Derecho Internacional*, 1(9), 631-675. <https://doi.org/10.22201/ijj.24487872e.2009.9.302>

Capítulo 2

Diagnóstico sobre la interacción química entre el recurso hídrico y los hidrocarburos en el municipio de San Fernando

Gloria Sandoval Flores

Profesora-Investigadora UAT

I. Introducción

En la región que comprende el municipio de San Fernando, Tamaulipas, en los últimos años se ha registrado un incremento de la actividad agrícola y de la extracción de hidrocarburos, hecho que ha llevado a especular sobre la calidad del recurso hídrico de la zona. Dichas actividades económicas han generado incertidumbre y temor respecto de algún evento que pueda poner en riesgo la seguridad de los habitantes, esto debido a que se han presentado accidentes con la explotación de pozos de gas, en donde las compañías causantes se hacen cargo de la reparación de los daños. A pesar de que se atienden las necesidades ambientales, no se puede dejar insatisfechos a los pobladores, quienes argumentan un deterioro en la calidad del ambiente desde los inicios de las operaciones de las empresas de hidrocarburos, así como la invasión de tierras destinadas al cultivo de sorgo, principal fuente de ingreso. A pesar del paso del tiempo, se ha cambiado el tipo de cultivo y este ha perdido cualidades, encareciendo la calidad final y obligando a la población a venderlo a un menor precio. El sorgo y otros cultivos se ven afectados por diversos factores: calidad del tipo de suelo, abonos, condiciones climáticas y calidad del agua de riego, la cual debe cumplir con ciertas características para beneficiar el crecimiento y calidad del producto.

Dado que la calidad del agua en esta zona puede ser afectada por el giro económico de la zona del municipio de Santa Gertrudis, San Fernando, Tamaulipas, México, se desarrolla la presente investigación para evaluar la calidad del recurso hídrico. Se realizó el muestreo de análisis químicos y físicos recolectados

para determinar el factor principal que degrada la calidad del agua, y que afecta de manera directa o indirecta la salud de las personas y el crecimiento del sorgo grano cultivado en la zona.

En temporada de lluvias se han registrado corrientes de agua, en las cuales se pretende descartar la presencia de hidrocarburos. En los terrenos donde se realizó el muestreo presentan pendientes pronunciadas, lo que ocasiona la acumulación de los cuerpos de agua. En este caso, se analizaron grasas y aceites para evaluar la cantidad de hidrocarburos presentes en el agua, sobre todo los de mayor peso molecular. Los hidrocarburos pesados pueden presentarse en cuerpos de agua, mientras que aquellos más ligeros utilizan como medio de transporte las emisiones, por su volatilidad. Para ello se tendría que considerar evaluar la calidad del aire y no la del agua.

1.1. Calidad del agua en México

En México, las instituciones públicas y privadas están obligados a cumplir con las regulaciones para el uso y descarga de agua. Existe una dependencia que tiene como misión la preservación del recurso hídrico nacional con un consumo sustentable: la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), institución que realiza análisis y censos sobre el agua nacional. Algunas de sus funciones y atribuciones son:

- Fungir como la autoridad en materia de la cantidad y de la calidad de las aguas y su gestión en el territorio nacional y ejercer en consecuencia aquellas atribuciones que conforme a la ley corresponden a la autoridad en materia hídrica.
- Formular la política hídrica nacional, así como dar seguimiento y evaluar de manera periódica el cumplimiento de dicha política.
- Integrar, formular y proponer al titular del Poder Ejecutivo Federal, el Programa Nacional Hídrico, actualizarlo y vigilar su cumplimiento.
- Programar, estudiar, construir, operar, conservar y mantener las obras hidráulicas federales directamente o a través de contratos o concesiones con terceros, y realizar acciones que correspondan al ámbito federal para el aprovechamiento integral del agua, su regulación y control, y la preservación de su cantidad y calidad.
- Apoyar, concesionar, contratar, convenir y normar las obras de infraestructura hídrica que se realicen con recursos totales o parciales de la Federación o con su aval o garantía, en coordinación con otras dependencias y entidades federales, con el gobierno del Distrito Federal, con gobiernos de los estados que correspondan y, por medio de estos, con los gobiernos de los municipios beneficiados con dichas obras.

- Participar en la concertación de créditos y otros mecanismos financieros, incluso sobre la participación de terceros en el financiamiento de obras y servicios, que apoyen la construcción y el desarrollo de las obras y servicios federales hidráulicos.
- Fomentar y apoyar los servicios públicos urbanos y rurales de agua potable, alcantarillado, saneamiento, recirculación y reúso en el territorio nacional.
- Fomentar y apoyar el desarrollo de los sistemas de agua potable y alcantarillado; los de saneamiento, tratamiento y reúso de aguas; los de riego o drenaje, y los de control de avenidas y protección contra inundaciones.
- Regular los servicios de riego en distritos y unidades de riego en el territorio nacional.
- Expedir títulos de concesión, asignación o permiso de descarga a que se refiere la Ley de Aguas Nacionales y su reglamento, reconocer derechos y llevar el Registro Público de Derechos de Agua.
- Promover en el ámbito nacional el uso eficiente del agua y su conservación en todas las fases del ciclo hidrológico, e impulsar el desarrollo de una cultura del agua.
- Realizar periódicamente, en el ámbito nacional, los estudios sobre la valoración económica y financiera del agua por fuente de suministro, localidad y tipo de uso.
- Estudiar los montos recomendables para el cobro de derechos de agua y tarifas de cuenca, incluyendo el cobro por extracción de aguas nacionales, descarga de aguas residuales y servicios ambientales vinculados con el agua y su gestión.
- Proponer a la SEMARNAT las Normas Oficiales Mexicanas en materia hídrica.
- Vigilar el cumplimiento y la aplicación de la Ley de Aguas Nacionales, interpretarla para efectos administrativos, aplicar las sanciones y ejercer los actos de autoridad en la materia.
 - Expedir en cada caso, respecto de los bienes de propiedad nacional, la declaratoria correspondiente, que se publicará en el Diario Oficial de la Federación, así como las declaratorias de clasificación de los cuerpos de agua nacionales a que se refiere la Ley de Aguas Nacionales.
- Participar en el sistema nacional de protección civil y apoyar en la aplicación de los planes y programas de carácter federal para prevenir y atender situaciones de emergencia causadas por fenómenos hidrometeorológicos extremos.
 - Proponer al titular del Poder Ejecutivo Federal la expedición de Decretos para el establecimiento, modificación o extinción de Zonas de Veda y de Zonas Reglamentadas para la Extracción y Distribución de Aguas Nacionales y para su explotación, uso o aprovechamiento, así como Declaratorias de Reserva de Aguas Nacionales y de zonas de desastre.

- Realizar las declaratorias de clasificación de zonas de alto riesgo por inundación y elaborar los atlas de riesgos conducentes.
- Coordinar el Servicio Meteorológico Nacional y ejercer las funciones en dicha materia.
 - Mantener actualizado y hacer público periódicamente el inventario de las aguas nacionales, y de sus bienes públicos inherentes y de la infraestructura hidráulica federal; clasificar las aguas de acuerdo con los usos, y elaborar balances en cantidad y calidad del agua por regiones y cuencas hidrológicas.
 - Presentar las denuncias que correspondan ante las autoridades competentes cuando, como resultado del ejercicio de sus atribuciones, tenga conocimiento de actos u omisiones que constituyan violaciones a la legislación administrativa en materia de aguas o a las leyes penales (CNDH, 2014).

En 2020, CONAGUA realizó en el territorio nacional un análisis para determinar la calidad del agua, muestreando los principales cuerpos superficiales y subterráneos. Con base en ello, creó un indicador “Semáforo” que toma en cuenta parámetros como: Coliformes Fecales (CF), Demanda química de Oxígeno (DQO), Sólidos Suspendidos Totales (SST), *Escherichia Coli*, (E. COLI), Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO), Toxicidad (TOX), Porcentaje de Saturación de Oxígeno (OD), Enterococos (ENTEREC) (CONAGUA, 2021). El 36.3 % de los sitios se catalogaron con color verde, con los límites aceptables de calidad del agua para los 8 parámetros analizados, el 32.5 % se catalogaron con color amarillo porque incumplieron uno o varios parámetros: E. COLI, CF, SST y OD, el 31.2 % en color rojo pudieron incumplir en: DBO, DQO, TOX y ENTEROC (CONAGUA, 2021).

1.2. San Fernando

El municipio de San Fernando, Tamaulipas, es una ciudad del centro norte del estado mexicano de Tamaulipas, en las llanuras del golfo de México. Su ubicación geográfica es 24 50 09 de latitud norte y 98 09 02 latitud oeste. Esta ciudad fue fundada el 19 de marzo de 1749 y cuenta con una extensión territorial de 6 091.36 kilómetros cuadrados, que representa el 6.88 % de la superficie total del estado (Gobierno del Estado de Tamaulipas [GET], 2022). San Fernando ha sido de gran importancia para el desarrollo económico, ya que a lo largo de su historia se ha caracterizado por su actividad agrícola. Como consecuencia de esto, la flora natural de la zona ha sido removida y reemplazada por áreas de cultivo, las cuales representan la mayor parte de la extensión del territorio municipal (Instituto Nacional de Estadística y Geografía [INEGI], 2010). Esto ha llevado a ser utilizado en su gran mayoría para el cultivo de sorgo grano (Figura 1), a nivel estatal es el

mayor tipo de cultivo producido, con una cantidad de 1 907 325 toneladas anuales en el 2020, otorgándole el primer lugar como productor de sorgo grano (GET Agricultura, 2022).

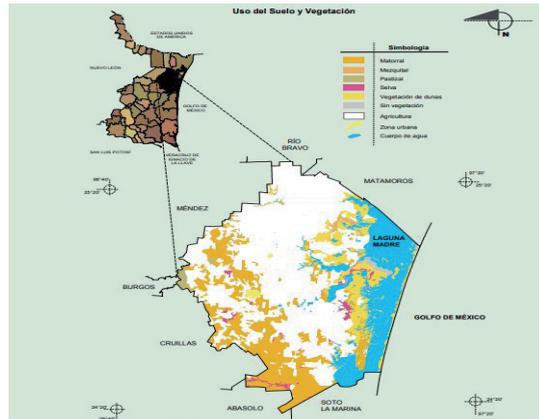


Figura 1. Uso de suelo y vegetación San Fernando, Tamaulipas
Fuente: INEGI.

1.2.1. Hidrografía del municipio de San Fernando

Los recursos hidrológicos del municipio se componen del río Conchos o río San Fernando, que forma la cuenca del mismo nombre (INAFED, 2022) En la Figura 2 se observan los principales cuerpos de agua superficiales del municipio y que pasan próximos al ejido Santa Gertrudis (CONAGUA, 2018).

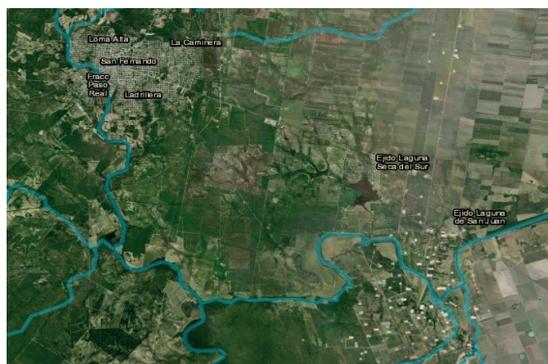


Figura 2. Recursos hídricos superficiales

Fuente: Sistema de Información Geográfica de Acuíferos y Cuencas (SIGAGUA), 2018.

La CONAGUA analizó el río San Fernando en el 2020 para determinar la calidad del recurso hídrico, resultando en semáforo amarillo por incumplir con alguno de los parámetros: E. COLI, CF, SST y OD %. En la presente investigación, se vuelve a analizar el agua de esta ubicación para actualizar los datos con la información oficial (CONAGUA, 2020). En la Figura 3 se aprecia el punto muestreado por parte de la CONAGUA en 2020 (punto a la izquierda, color azul). También se observan los puntos muestreados en este trabajo, que corresponden a la ubicación del Ejido Santa Gertrudis.

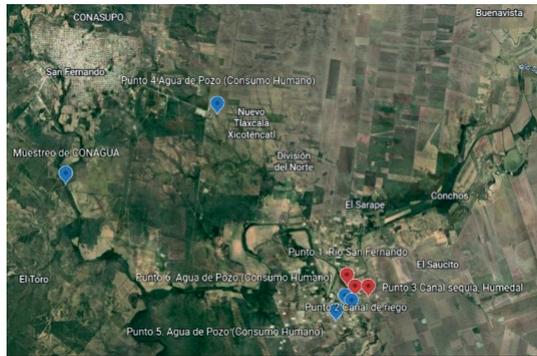


Figura 3. Puntos de muestro del estudio: punto 1, punto 3 y punto 6 de color rojo; punto 4, punto 2, punto 5 y punto 7 de color azul; puntos de muestreo de CONAGUA en 2020 (punto azul aguas arriba del Río San Fernando, Tamaulipas)

Fuente: elaboración propia con aplicación de Google Maps.

1.2.2. Recursos hidrológicos subterráneos de San Fernando

En el municipio de San Fernando se presentan cuerpos de agua subterráneos, los cuales nacen principalmente del acuífero Méndez-San Fernando. Este acuífero comprende en su totalidad los municipios de San Fernando, Méndez, Cruillas y Burgos. Parcialmente comprende los municipios de Matamoros, China y General Terán, estos dos últimos en el estado de Nuevo León (CONAGUA, 2020). En la Figura 4 se aprecia la zona del acuífero Méndez-San Fernando con un área de 19063.74 km² (CONAGUA, 2022).

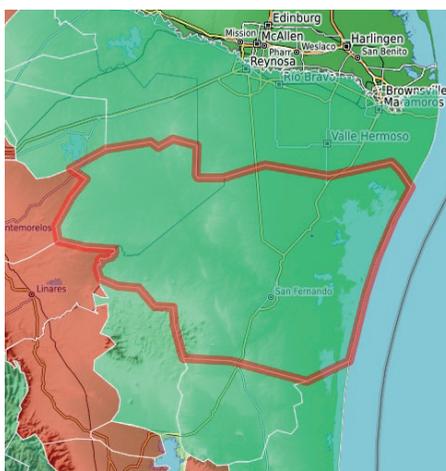


Figura 4. Acuífero Méndez-San Fernando

Fuente: CONAGUA 2020.

Para la comprensión del aprovechamiento total del agua del acuífero Méndez-San Fernando, es necesario censar los puntos de extracción de agua, considerando el volumen anual utilizado y el tipo de bombeo de la extracción. Sin embargo, el Registro Público de Derechos del Agua cuenta con información de las licitaciones de extracción del recurso, proporcionando un estimado del uso del agua subterránea en los distintos sectores económicos. La cantidad de aprovechamientos o pozos existentes en la zona donde se extrae agua del acuífero Méndez-San Fernando se presenta en la Tabla 1. Las extracciones para el fin agrícola representan el 5 %, aunque es diferente la situación en cuanto a m³ extraídos.

Tabla 1. Número de aprovechamientos de agua del acuífero Méndez-San Fernando

Uso	Número de aprovechamientos
Agrícola	43
Doméstico	215
Industrial	3
Múltiples	15
Pecuario	295
Público urbano	258
Servicio	4
Total	833

Fuente: elaboración propia.

La Tabla 2 muestra que el volumen en m³ es distinto. A pesar de que el sector agrícola tiene menos tomas de agua, su consumo es el mayor (CONAGUA, 2020). El 7.16 % de la población de San Fernando en 2020 no contaba con agua potable (Data México, 2020).

Tabla 2. Volumen en metros cúbicos de agua extraído del acuífero Méndez-San Fernando

Uso	Volumen (m ³)
Agrícola	8 682 492
Doméstico	313 863
Industrial	14 060
Múltiples	15 954
Pecuario	414 370
Público urbano	5 612 482
Servicios	91 364
Total	15 144 584

Fuente: elaboración propia.

Estos datos revelan una situación que exige el monitoreo y determinación de la calidad del uso hídrico para la población. La CONAGUA presentó en 2020 los resultados del análisis de aguas superficiales en el río San Fernando, que corresponden al color amarillo-rojo. Los principales valores superan los niveles regulatorios en los parámetros de: SST, SCF, E. COLI, SDT salin y DQO. Y respecto a la calidad en la red de agua subterránea, se consideraron 14 indicadores fisicoquímicos y microbiológicos: fluoruros, coliformes fecales, nitrógeno de nitratos, arsénico, cadmio, cromo, mercurio, plomo, alcalinidad, conductividad, dureza, sólidos disueltos totales, manganeso y hierro. Según los análisis de los 6 pozos subterráneos de San Fernando (Tabla 3), la calidad no es apta para cultivos de sorgo (CONAGUA, 2022).

Tabla 3. Parámetros reportados para agua subterránea del municipio de San Fernando, Tamaulipas. Periodo 2012-2022

Pozo	Longitud	Latitud	Contaminante
Pozo 30 Ejido Alfredo V. Bonfil	-97.968778	25.200500	CONDUC, SDT_ra, SDT_salín, DT,
Pozo 34 El Canelo	-97.989639	25.169472	CONDUC, SDT_ra, SDT_salín, DT,
Pozo 36 Ejido 20 De Noviembre	-98.154556	25.140028	CONDUC, SDT_ra, SDT_salín, DT, NO ₃ ,
Pozo 46 Ejido Águila Azteca	-98.111472	25.094028	CONDUC, DT,
Pozo 48 Ampliación San Germán	-98.053444	25.094083	CONDUC, SDT_ra, SDT_salín, DT
Pozo 67 Ejido Francisco Villa	-98.076639	25.015833	CONDUC, DT

Fuente: elaboración propia con datos de CONAGUA (2020).

1.3. Industria de extracción de hidrocarburos. Zona norte de Tamaulipas

El municipio de San Fernando ha tomado importancia en la explotación de pozos de gas que pertenecen a la cuenca de Burgos ubicada en el noreste del país, en los estados de Coahuila, Nuevo León y Tamaulipas, con una extensión de 73 800 km² y 650 km de largo (CNH, 2022). El municipio de San Fernando se suma a una de las zonas predominantes en la extracción de gas Shale. Según la *Energy International Administration*, San Fernando alberga el 70 % de la reserva nacional de este hidrocarburo (Morales y Roux, 2015).

En la zona donde se realizó el estudio labora la empresa Iberoamericana de Hidrocarburos (IHSA), que se encarga de los pozos NEJO, los cuales son una cantidad considerable en el ejido Santa Gertrudis, sumando más de 20 campos de extracción de gas en la zona. En la Figura 5 se observa una muestra de los pozos ubicados en la zona (CNH, s.f.). En los campos de extracción se encuentran distintas cantidades de pozos, aunque algunos no operan actualmente. La contaminación del líquido hídrico se ha presentado desde la llegada de las empresas trasnacionales para la explotación de pozos de gas, de acuerdo con pobladores de la zona. Es conocido que las prácticas utilizadas en la cuenca de Burgos para la extracción de gas son a través de la fractura hidráulica (*fracking*) mismo que representa un impacto para el medioambiente al generar residuos que requieren una disposición

final adecuada. Aunado a esto, en los últimos años han incrementado la actividad agrícola y la extracción de hidrocarburos. Esto ha llevado a especular sobre la calidad del recurso hídrico de la zona. Diversas fuentes periodísticas (*Milenio*, 2014; *Excelsior*, 2014; *CNT*, 2014, 2018) han documentado docenas de derrames de condensado, fugas de gas y explosiones que han ocurrido en los Nejos y en el CML (Centro de Manejo de Líquidos, IHSA) durante los últimos 6 años, como negligencia de IHSA y la tolerancia de PEMEX, al omitir las supervisiones y mantenimiento que requieren las instalaciones, generando incertidumbre sobre las buenas prácticas de explotación de los pozos llamados Nejos.

Tabla 4. Reporte de accidentes en la zona de los pozos Nejos en San Fernando, Tamaulipas

Fecha del incidente	Lugar	Suceso	Consecuencias
21 octubre 2018	Pozo Nejo 1	Explosión de caldera	Lesiones a empleados y automóviles.
Diciembre 2014	Pozo Nejo 57	Fuga de gas	Lesiones a empleados. 1 mes para ser controlado el suceso.
Octubre 2017	Zona de los Nejos	Derrame de condensado	Contaminación de diversas zonas de producción agrícola.
15 de enero de 2013	Centro de manejo Loquios-CML. Propiedad de IHSA	Pipa de condensado explotó	En este centro se almacenan 2 millones de litros de condensado.

Fuente: elaboración propia con información encontrada en medios periodísticos.

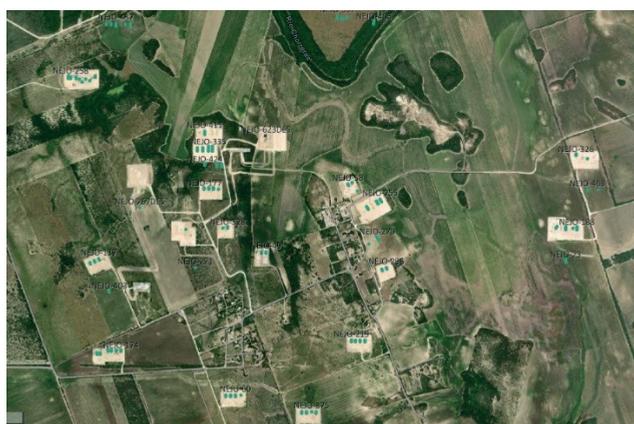


Figura 5. Pozos de gas zona muestreo

Fuente: CNH.

A su vez, una de las técnicas utilizadas para la extracción de gas en la cuenca de burgos es el conocido *fracking*, que utiliza agua para aplicar presión en los pozos agotados, misma que al estar en contacto con los hidrocarburos puede arrastrar partículas de sales minerales para después ser reintegrada a pozos de agua utilizados para el consumo humano y el riego de los cultivos en temporadas de bajas precipitaciones. La cantidad de sal en estas aguas puede afectar la salud de las personas. Incluso en épocas en las que no suelen presentarse casos de diarrea, se han reportado episodios de este problema.

Por otro lado, los cultivos de sorgo en la zona son considerados de temporal, lo que significa que solo adquieren el líquido en temporada de lluvias y a través de los cuerpos de agua naturales superficiales, los cuales comprenden un canal de temporal y el río San Fernando. El punto que se tomó de muestreo en este estudio se encuentra aguas abajo de este río. Los análisis que puede dar justificación a la injerencia de la producción de gas en la salud de las personas y la mala calidad del cultivo de sorgo grano son aquellos como cloruros, dureza total y conductividad eléctrica. Para descartar que los cuadros clínicos de diarrea que presentan los pobladores sean por la contaminación de los tanques de agua por medio de algún microorganismo patógeno que se encuentre en el agua, se cuentan los coliformes fecales en placa. El estudio descarta mitos de contaminación y respalda la calidad del recurso hídrico para sus subsecuentes usos.

2. Metodología

El proceso experimental se realizó con 3 muestreos en los meses de septiembre, octubre y noviembre del 2021, para comparar las variaciones temporales, siendo septiembre el mes con menor presencia de precipitaciones. La recolección de las muestras radicó en la ubicación de los principales puntos de agua de la zona, dichos puntos correspondientes a la parte ejidal del municipio de San Fernando, Tamaulipas, que lleva por nombre Santa Gertrudis, que cuenta con 3 fuentes principales de agua, el río San Fernando como principal cuerpo de agua que atraviesa la lateral del ejido. Los sitios seleccionados fueron identificados con ayuda del personal residente en la zona, optando por estos lugares debido al flujo de agua que se presenta en las temporadas de lluvia. En las Figuras 6 y 7, los puntos identificados de color azul corresponden a aguas superficiales. Los sitios de muestreo se encuentran próximos a las zonas donde se cultiva sorgo grano; sin embargo, los puntos de extracción de gas se encuentran a un nivel más arriba en el relieve del suelo y a una distancia mayor en comparación con la zona de cultivo.

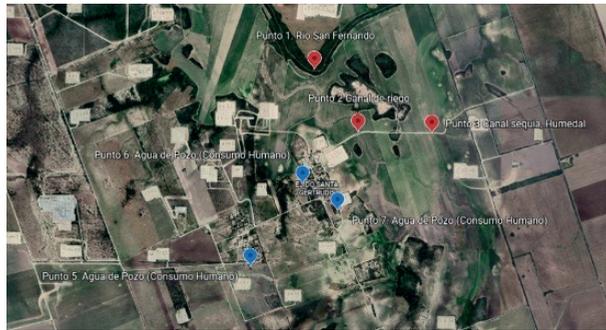


Figura 6. Sitios de muestreo del estudio: punto 1, punto 2, punto 3 de color rojo; punto 5, punto 6 y punto 7 de color azul)

Fuente: Google Maps.

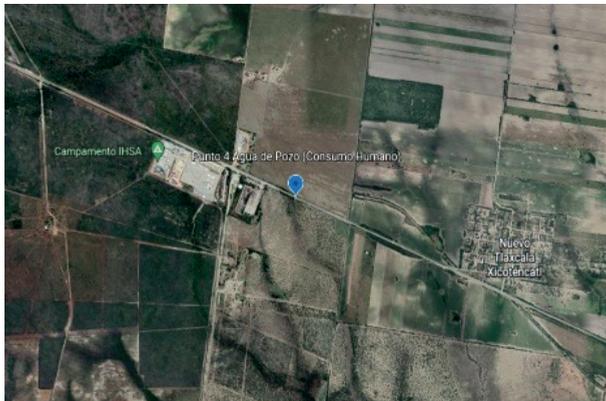


Figura 7. Sitio 4 de muestreo del estudio (punto azul)

Fuente: Google Maps.

En la zona se muestrearon 4 pozos de agua para consumo humano, los cuales se encuentran a escasos metros de pozos de extracción de gas natural. Todos los pozos de agua para consumo humano se encuentran en un relieve mayor al del río San Fernando, pero a nivel de suelo donde se realizan los cultivos de sorgo grano. La recolección de agua es directa de estos pozos sin algún tipo de tratamiento o filtración. A continuación, se presenta la información geográfica de los sitios muestreados (Tabla 5).

Tabla 5. Sitios de Muestreo para el análisis con sus coordenadas

Nombre del punto de muestreo	Puntos de muestreo		
	Tipo de agua	Coordenadas	
		Latitud	Longitud
Punto 1	Río San Fernando	24.7402778°	-98.0129722°
Punto 2	Canal de riego	24.7375514°	-97.9974089°
Punto 3	Canal de riego, temporal	24.73495°	-98.0021532°
Punto 4	Agua de pozo, consumo humano	24.8208611°	-98.0780278°
Punto 5	Agua de pozo, consumo humano	24.72375°	-98.0188333°
Punto 6	Agua de pozo, consumo humano	24.7306667°	-98.0140833°
Punto 7	Agua de pozo, consumo humano	24.728567°	-98.0108564°

Fuente: elaboración propia.

Los procedimientos para el muestreo y análisis de las aguas fueron determinados con base en la fuente del cuerpo de agua y el uso final que se le daba a la misma, siendo catalogados en dos tipos: aguas de riego, provenientes de canales y del río San Fernando; y aguas de consumo humano, provenientes de pozos de agua. Con esta diferencia se extraen y comparan los resultados, de acuerdo con las Normas Oficiales Mexicanas (NOM) aplicables a cada parámetro. A continuación, se presentan los análisis realizados. Los primeros datos recolectados de las muestras fueron sus características físicas (Tabla 6).

Tabla 6. Normas Mexicanas de control para análisis fisicoquímicos de la calidad del agua

Análisis	Fundamento	Norma Mexicana de control
Color aparente	Es el color de la muestra debido a sustancias en forma disuelta y al proporcionado por sólidos suspendidos.	NMX-AA-045-SCFI-2001
Olor	La ausencia o presencia de olores extraños se realiza una vez recolectada la muestra y en su contenedor correspondiente.	NOM-127-SSA1-1994 NOM-127-SSA1-2021
Sabor	Se aceptarán aquellos que sean tolerables para la mayoría de los consumidores, siempre que no sean resultados de condiciones objetables desde el punto de vista biológico o químico.	NOM-127-SSA1-1994 NOM-127-SSA1-2021

Análisis	Fundamento	Norma Mexicana de control
Análisis de pH	Lectura de la basicidad o acidez del fluido.	NMX-AA-008-SCFI-2016 (Secretaría de Economía, 2016)
Análisis de sólidos sedimentables	En la prueba del cono Imhoff, representa el volumen de materia que se deposita en el fondo del cono en 1 hora.	NMX-AA-004-SCFI-2013 (Secretaría de Economía, 2013)
Análisis de materia flotante	Se basa en la observación de la materia flotante en una muestra de aguas residuales en el sitio de muestreo mediante la separación de esta en una malla de aproximadamente 3 mm de abertura; este método es una prueba cualitativa.	NMX-AA-006-SCFI-2010 (Secretaría de Economía, 2010)
Análisis de determinación de conductividad eléctrica	Este método se basa en la propiedad que adquiere el agua de conducir la corriente eléctrica cuando tiene iones disueltos. La conducción de la corriente eléctrica en agua puede explicarse por medio de la disociación electrolítica. Cuando se disuelve en agua un ácido, una base o una sal, una porción se disocia en iones positivos y otra en negativos.	NMX-AA-093-SCFI-2000 (Secretaría de Economía, 2000)
Análisis de cloruros	La determinación de cloruros por este método se basa en una valoración con nitrato de plata utilizando como indicador cromato de potasio. La plata reacciona con los cloruros para formar un precipitado de cloruro de plata de color blanco. En las inmediaciones del punto de equivalencia al agotarse el ión cloruro, empieza la precipitación del cromato. La formación de cromato de plata puede identificarse por el cambio de color de la disolución a anaranjado-rojizo, así como en la forma del precipitado. En este momento se da por terminada la valoración.	NMX-AA-073-2001 (Secretaría de Economía, 2001)
Análisis Demanda Química de Oxígeno (DQO):	Reflujo en presencia de sulfato de mercurio (II) de una porción de prueba con una cantidad conocida de dicromato de potasio y catalizador de plata en ácido sulfúrico concentrado en un periodo fijo, durante el cual parte del dicromato es reducido por el material oxidable presente. Titulación del remanente del dicromato con sulfato ferroso amoniacal. Cálculo del valor de la DQO a partir de la cantidad de dicromato reducido.	NMX-AA-030/1-SCFI-2012 (Secretaría de Economía, 2012)
Análisis de grasas y aceites	Este método se basa en la adsorción de grasas y aceites en tierra de diatomeas, los cuales son extraídos en un equipo de extracción por recirculación empleando hexano como disolvente. Una vez terminada la extracción, se evapora el hexano y se pesa el residuo que ha quedado en el recipiente; siendo este valor el contenido de grasas y aceites.	NMX-AA-005-SCFI-2013. (Secretaría de Economía, 2013)

Análisis	Fundamento	Norma Mexicana de control
Análisis de coliformes fecales	Inoculación de alícuotas de muestra, diluida o no diluida, en una serie de tubos. En medio líquido selectivo conteniendo lactosa. Examen de los tubos después de 24 h y de 48 h incubados a 35 °C ± 0.5 °C. Subcultivo de cada tubo que muestre turbidez y producción de gas en un medio confirmativo más selectivo, y cuando se busca E. coli se subcultiva en un medio donde pueda ser demostrada la formación de indol.	NMX-AA-042-SCFI-2015 (Secretaría de Economía, 2015)
Análisis de durezas totales	El método se basa en la formación de complejos por la sal disódica del ácido etilendiaminotetraacético con los iones calcio y magnesio. El método consiste en una valoración empleando un indicador visual de punto final, el negro de eriocromo T, que es de color rojo en la presencia de calcio y magnesio y vira a azul cuando estos se encuentran complejados o ausentes.	NMX-AA-072-SCFI-2001 (Secretaría de Economía, 2001)

Fuente: elaboración propia.

3. Resultados

Los resultados se describen conforme la procedencia de la muestra, de modo que se categorizan en las extraídas de los efluentes superficiales -canal de riego y río San Fernando- y las de los efluentes subterráneos -pozos de agua para consumo humano-. A su vez, se realiza la comparación con los valores de las NOM. Los resultados de análisis de agua a efluentes superficiales se pueden observar en la Tabla 7, utilizada principalmente para el riego de los cultivos. Asimismo, los resultados de las aguas subterráneas se presentan en la Tabla 8. Estos datos son el valor promedio de las muestras tomadas en 3 periodos de muestreo.

Tabla 7. Resultados de las muestras de procedencia de agua de río y canal para riego de cultivos. Y valores máximos permisibles para las aguas de efluentes naturales superficiales, de acuerdo con la NOM-002-SEMARNAT-1996

Valores Máximos Permisibles (NOM-002-SEMARNAT-1996)					
Parámetros	Nivel máximo	Río (Punto 1)	Canal 1 (Punto 2)	Canal 2 (Punto 3)	Río CONAGUA 2022
Temperatura	40 °C	23	22	22	NA
Conductividad eléctrica	50-549µS/cm	572.778	347.017	375.9	NA
pH	5 a 10	7.25	7.766	7.19	NA
Sólidos sedimentables	1 mL/L	0.1	0.15	0.2	NA

Valores Máximos Permisibles (NOM-002-SEMARNAT-1996)					
Parámetros	Nivel máximo	Río (Punto 1)	Canal 1 (Punto 2)	Canal 2 (Punto 3)	Río CONAGUA 2022
Sólidos suspendidos totales	150 mg /L	50	10	4	65
Cloruros	250 mg/L	97.02	65.75	85.61	NA
Demanda Química de Oxígeno (DQO)	50-2000mg/L	48	<0.1	<0.1	13.785
Materia flotante	Ausente	Ausente	Ausente	Ausente	NA
Dureza total	80-149mg CaCO ₃ /L	384	280	345.8	NA
Coliformes fecales	Ausente	Ausente	Ausente	Ausente	Presente

Fuente: elaboración propia.

Tabla 8. Resultados de los análisis para aguas extraídas de pozo, con uso principal de consumo humano

Parámetros	Nivel máximo	Resultado pozo 1 (Punto 4)	Resultado pozo 2 (Punto 5)	Resultado pozo 3 (Punto 6)	Resultado pozo 4 (Punto 7)
Temperatura	40 °C	23	22	22	24
Color	Sin color	Sin color	Sin color	Sin color	Sin color
Olor	Olor	Sin olor	Sin olor	Sin olor	Sin olor
Sabor	Sin sabor	Sin sabor	Sin sabor	Sin sabor	Sin sabor
Conductividad eléctrica	50-549µS/cm	864.111	548	454.33	665
pH	5 a 10	7.662	7.48	7.665	7
Sólidos suspendidos totales	150 mg/L	24	10	4	8
Cloruros	250 mg/L	581.91	416.14	187.84	705.98
Demanda Química de Oxígeno (DQO)	50-2000mg/L	364.8	297.6	316.8	384
Materia flotante	Ausente	Ausente	Ausente	Ausente	Ausente
Coliformes fecales	Negativo	Negativo	Negativo	Negativo	Negativo
Dureza total	80-149mg CaCO ₃ /L	694	636	364	764
Grasas y aceites	Negativo mg/L	Negativo	Negativo	Negativo	Negativo
Coliformes fecales	Ausente	Ausente	Ausente	Ausente	Ausente

Fuente: elaboración propia.

Los resultados para la determinación de la calidad del agua, según el semáforo utilizado por CONAGUA, incluyen el análisis de coliformes fecales, en donde los resultados para todas las muestras fueron negativos en el lapso estimado de 24 horas.

4. Discusión y conclusiones

Los resultados indican la ausencia de hidrocarburos en los cuerpos de agua en los que fue realizado el muestreo. Un resultado negativo en hidrocarburos pesados indica que el agua no está siendo afectada por la explotación de los pozos de gas, aun cuando dichos puntos de extracción se encuentran en funcionamiento y a una distancia relativamente cercana a los cuerpos de agua subterráneos, por lo que el líquido no es el medio de transporte de dichas emisiones. Los valores que se obtuvieron relativamente fuera de lo normal, fueron la dureza total, cloruros y la conductividad eléctrica, debido quizás a una elevada presencia de sales en los puntos de muestreo. En las muestras de agua para riego, se presentó una conductividad alta, siendo el agua del río San Fernando el máximo con 572.78 $\mu\text{S}/\text{cm}$ y una dureza total de 384 mg CaCO_3/L . Esto se debe a que, en época de lluvia el río recibe agua de escurrimiento de los terrenos cercanos, principalmente cultivos de sorgo. Para las muestras de agua de pozo, resultó ser más alto para el pozo 1 con una conductividad de 864 $\mu\text{S}/\text{cm}$, una dureza total de 694 mg CaCO_3/L , pero con presencia de cloruros de 581.9 mg/L. Los resultados en aguas subterráneas son casi el doble de las de aguas superficiales, lo que hace cuestionarse sobre la procedencia de dicha salinidad.

Estudios de la SEMARNAT en el 2015 han mostrado que Tamaulipas posee numerosas secuencias sedimentarias de origen marino. La distribución de las unidades litoestratigráficas es el resultado de los eventos geológicos que definieron diferentes ambientes y medios de depósito a través del tiempo geológico. En este informe se reportan 6 unidades geoelectricas en la zona del acuífero Méndez-San Fernando: la unidad geoelectrica 1 se identificó con los materiales granulares gruesos y el caliche que forma la parte superior de la zona; la unidad 2 se correlacionó con una capa de materiales arcillo-arenosos impermeables; la 3 se correlacionó con materiales granulares gruesos consistentes en gravas y arenas, posiblemente relacionados a un conglomerado de permeabilidad media, que constituye el principal acuífero de la zona; la 4 se correlacionó con arenas con predominio de finos y agua salobre; la 5 se correlacionó con arenas, gravas y arcillas contaminadas con agua salada; y la 6 solo se registró en una porción del perfil 1 y se correlacionó con roca ígnea fracturada. El acuífero se alimenta de la infiltración de la zona serrana al suroeste, con escurrimientos generados por la precipitación pluvial, que al igual que el agua subterránea, siguen su curso al golfo de México. Las unidades

de roca en la zona presentan diferentes características en cuanto a su capacidad para permitir la infiltración, circulación y almacenamiento del agua subterránea. Los depósitos aluviales conformados por arcillas, arenas y gravas constituyen un acuífero libre de baja permeabilidad; su recarga ocurre por la infiltración del agua de lluvia que ocurre en el área y por las aportaciones de los arroyos y ríos que drenan la zona; su descarga se realiza por la extracción que se efectúa en norias y pozos someros, y en forma natural por flujo horizontal hacia la Laguna Madre (SEMARNAT, 2015).

La naturaleza del acuífero es ligeramente salina y CONAGUA ha reportado estos niveles para concienciar a las personas del cuidado y el manejo adecuado del recurso hídrico. Sin embargo, en esta zona norte de Tamaulipas se ha castigado el giro del uso del suelo, tanto para la agricultura como en la explotación de la industria petrolera. La actividad agrícola incrementa el riesgo de salinización y contaminación del agua subterránea por el uso de sus agroquímicos, esto aunado al crecimiento urbano, que genera contaminación producida por las descargas de las industrias y por la bacteriológica originada en los centros de población por el manejo inadecuado del agua residual. Estas problemáticas, aunadas al origen estratigráfico de la zona con una salinidad característica de su formación, llevan a tener presente la supervisión constante de las actividades económicas y de crecimiento poblacional para evitar la contaminación del acuífero a niveles en los que se deban implementar técnicas de desalinización que incrementarían el costo y la disposición del agua.

5. Referencias

- Centro Noticias Tamaulipas. (2018). San Fernando sentado en una bomba de tiempo. <https://cntamaulipas.mx/2018/10/29/san-fernando-sentado-sobre-una-bomba-de-tiempo/>
- CNDH. (2014). El derecho humano al agua potable y saneamiento. <https://www.cndh.org.mx/documento/el-derecho-humano-al-agua-potable-y-saneamiento>
- CNH. (2022). *Atlas Geológico Cuencas Sabinas-Burgos*.
_____. (s.f.). *Mapa de la industria de hidrocarburos*. <https://mapa.hidrocarburos.gob.mx/>
- CONAGUA. (2018). *Sistema de información de cuencas y acuíferos (SIGACUA)*. Comisión Nacional del Agua: <https://sigagis.conagua.gob.mx/aprovechamientos/>
_____. (2020, diciembre). *Actualización de la disponibilidad de agua en el acuífero Méndez-San Fernando, estado de Tamaulipas*. https://sigagis.conagua.gob.mx/gas1/Edos_Acuiferos_18/tamaulipas/DR_2802.pdf

- _____. (2021, 1 de marzo). *Calidad del agua en México*. <https://www.gob.mx/conagua/articulos/calidad-del-agua>
- _____. (2022). *Disponibilidad media anual por acuíferos*. Gobierno de México. <https://sigaims.conagua.gob.mx/dma/acuiferos.html>
- Data México. (2020). *DataMexico*. San Fernando: <https://www.datamexico.org/es/profile/geo/san-fernando-28035>
- Gobierno del Estado de Tamaulipas. (2022). *San Fernando*. <https://www.tamaulipas.gob.mx/estado/municipios/san-fernando/>
- Gobierno del Estado de Tamaulipas, Agricultura. (2022). *Temas del sector agricultura*. <https://www.tamaulipas.gob.mx/desarrollorural/temas-del-sector/agricultura/>
- INAFED. (2022). *San Fernando. Enciclopedia de los Municipios y Delegaciones de México*. <http://inafed.gob.mx/work/enciclopedia/EMM28tamaulipas/municipios/28035a.html>
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía -INEGI-. (2010). *Compendio de información geográfica municipal 2010 San Fernando Tamaulipas*. https://www.inegi.org.mx/contenidos/app/mexicocifras/datos_geograficos/28/28035.pdf
- Instituto Nacional para el Federalismo y el Desarrollo Municipal. (2022). *Tamaulipas - San Fernando. Enciclopedia de los Municipios y Delegaciones de México*. <http://inafed.gob.mx/work/enciclopedia/EMM28tamaulipas/municipios/28035a.html>
- Milenio Noticias. (2014). Se incendia pozo de gas natural en San Fernando. *Milenio Noticias*. <https://www.milenio.com/estados/incendia-pozo-gas-natural-san-fernando>
- Morales, D. y Roux, R. (2015). Estudio de impacto social: antecedentes y línea base para San Fernando, Tamaulipas. *Revista Internacional de Ciencias Sociales y Humanidades SOCIOIAM*, XXV(1), 111-130.
- Secretaría de Economía. (2001). *Análisis de agua - determinación de cloruros totales en aguas naturales, residuales y residuales tratadas-método de prueba*. Diario Oficial de la Federación.
- _____. (2001). *Análisis de agua-determinación de dureza total en aguas naturales, residuales y residuales tratadas - método de prueba*. Diario Oficial de la Federación.
- _____. (2010). *Análisis de agua-determinación de materia flotante en aguas residuales y residuales tratadas - Método de prueba*. Diario Oficial de la Federación.
- _____. (2012). *Análisis de agua-medición de la demanda química de oxígeno en aguas naturales, residuales y residuales tratadas-método de prueba*. Diario Oficial de la Federación.
- _____. (2013). *Análisis de agua-medición de grasas y aceites*. Diario Oficial de la Federación.
- _____. (2013). *Análisis de agua-medición de sólidos*. Diario Oficial de la Federación.
- _____. (2015). *Análisis de agua-enumeración de organismos coliformes totales, organismos coliformes fecales (termoestables) y escherichia coli*. Diario Oficial de la Federación.
- _____. (2016). *Análisis de agua.-medición del pH en aguas*. Diario Oficial de la Federación.
- _____. (2018). *Conductividad electrolítica - Método de prueba*. Diario Oficial de la Federación.

Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. (2015). *Acuerdo por el que se da a conocer el resultado de los estudios técnicos de las aguas nacionales subterráneas del acuífero Méndez-San Fernando, clave 2802, en el estado de Tamaulipas, región hidrológico-administrativa golfo norte.* Diario Oficial de la Federación.

Capítulo 3

Elementos inorgánicos potencialmente tóxicos en zonas de extracción de hidrocarburos

Adán Waldemar Echeverría García

Universidad Tecnológica de Matamoros

I. Introducción

Los metales son buenos conductores de calor y electricidad; pueden ser derretidos o fusionados, son más o menos maleables (forman hojas delgadas o láminas) y dúctiles (forman alambres), además de que la mayoría de ellos son sólidos a temperatura ambiente. Además, poseen propiedades de dureza, con excepción de los alcalinos que son muy suaves. Son elementos que tienden a perder electrones para formar iones positivos (cationes) y unirse a otros elementos pudiendo formar hidruros metálicos, óxidos, sales haloideas o hidróxidos. Los metaloides o semimetales se comportan como no metales, química y físicamente, pero por su conductividad eléctrica se parecen más a los metales, aunque en menor grado. En el entorno, su concentración varía para diferentes ambientes, presentándose como mezclas y compuestos. Al ser asimilados desde el ambiente (agua, aire, suelo) pueden causar efectos tóxicos en la flora, la fauna e incluso en humanos (ecotoxicidad) debido a la incapacidad de los organismos para regularlos o almacenarlos. A estos elementos, en contaminación ambiental, se les ha llamado “metales pesados” y pueden bioacumularse en las cadenas tróficas, aumentando sus concentraciones en organismos de mayor tamaño al consumir a organismos más pequeños que los contengan en sus sistemas.

2. ¿Metales pesados o elementos inorgánicos potencialmente tóxicos?

El término “metal pesado” se utiliza en contaminación ambiental, considerando por igual a los elementos metálicos y a los metaloides que presenten una densidad mayor a 5 g/cm³; por años han reunido bajo este término a metales de transición, semimetales, lantánidos y actínidos por igual. En la actualidad, el término “metal pesado” se considera inapropiado (aunque por desconocimiento se siga utilizando), pues la densidad específica no es referencia de la reactividad, toxicidad o ecotoxicidad de este tipo de elementos. Por lo anterior, otra clasificación más aceptada se enfoca en las propiedades químicas, clasificándolos como de clase A (duros), de clase B (suaves) y de frontera (*borderline* o intermedios) (Tabla 1).

Tabla 1. Clasificación de EIPT por su dureza y carga iónica

Elementos	Clase A (duros)	Clase B (ligeros)	Frontera (<i>borderline</i>)	Cationes	Aniones
Aluminio (Al)	X			X	
Antimonio (Sb)			X	X	
Arsénico (As)			X		X
Bario (Ba)	X			X	
Be (Berilio)	X			X	
Cadmio (Cd)			X	X	
Cromo (Cr)			X		X
Cobalto (Co)			X	X	
Cobre (Cu)		X	X	X	
Estroncio (Sr)	X			X	
Manganeso (Mn)			X	X	
Mercurio (Hg)		X		X	
Molibdeno (Mo)			X	X	
Níquel (Ni)			X	X	
Plata (Ag)		X		X	
Plomo (Pb)		X	X	X	
Selenio (Se)			X		X
Talio (Tl)		X		X	
Vanadio (V)			X		X
Zinc (Zn)			X	X	

Fuente: Neiboer y Richardson (1980) y Duffus (2002).

Muchos iones de clase A forman complejos mediante uniones iónicas con ligandos similares que no se polarizan, son móviles y se desplazan con facilidad. Mientras que muchos de la clase B se unen preferentemente a ligandos suaves polarizables para dar uniones más covalentes, son donantes de sulfuro o azufre, y tienden a acumularse en organismos. Medirlos permite evaluar su impacto sobre los ecosistemas y establecer medidas de control para su disposición.

Por estas connotaciones de toxicidad, la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos de América (EPA, por sus siglas en inglés) los supone un peligro tóxico, y considera de interés primordial los siguientes: Al, Sb, As, Ba, Be, B, Cd, Cr, Co, Cu, Fe, Pb, Mn, Hg, Mo, Ni, Se, Ag, Sr, Sn, Tl, V y Zn (23 elementos en total); mientras que para México, la norma oficial mexicana, NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004, presenta concentraciones de remediación para suelos contaminados para As, Ba, Be, Cd, Cr hexavalente, Hg, Ni, Ag, Pb, Se, Tl y V; apenas 12 de los 23 elementos que contempla la USEPA, y la consideración de un menor número implica un riesgo potencial para los ecosistemas de México (Tabla 2).

Tabla 2. Elementos inorgánicos potencialmente tóxicos en suelos

US/EPA	Al, Sb, As, Ba, Be, B, Cd, Cr, Co, Cu, Fe, Pb, Mn, Hg, Mo, Ni, Se, Ag, Sr, Sn, Tl, V y Zn
NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004	As, Ba, Be, Cd, Cr hexavalente, Hg, Ni, Ag, Pb, Se, Tl y V

Fuente: elaboración propia.

En la norma técnica mexicana NMX-AA-91-1987 se define a un ‘agente tóxico’ como “toda sustancia o mezcla de sustancias que ejerzan acción química, fisicoquímica o químico biológica nociva sobre los organismos vivos, y que por contacto o ingestión pueden causar incluso su muerte”; mientras que la NMX-AA-132-SCFI-2015 establece especificaciones para obtener, manejar y caracterizar muestras de suelos a través de la identificación y cuantificación de los siguientes elementos: As, Ba, Be, Cd, Cr hexavalente, Hg, Ni, Ag, Pb, Se, Tl y V, que son considerados en la literatura como “metales pesados”, pero que deberían ordenarse en tres categorías: clase A, B y frontera (*borderline* o intermedios), considerando sus valencias y su capacidad para realizar enlaces, y no únicamente su densidad; renombrándolos como ‘elementos inorgánicos potencialmente tóxicos’ (EIPT). Para abordar la contaminación ambiental, la ecotoxicidad por elementos metálicos, metaloides y no metales, debe ser ajustada a la nueva terminología internacional.

3. Enfoque toxicológico

Los EIPT no se destruyen, solo cambian de forma, y sus concentraciones afectan procesos naturales en mayor medida que los contaminantes orgánicos. El efecto de un ion metálico dependerá no sólo del tipo de organismo sobre el que actúa, sino también de las condiciones de administración, disponibilidad, concentración y modo de absorción. Una vez que los EIPT ingresan al organismo, para que produzcan efectos fisiológicos o tóxicos, alguno de sus iones debe entrar a la célula y, por semejanza estructural, ciertos cationes metálicos divalentes desplazarán a otros elementos de sus funciones fisiológicas en la célula; por ejemplo, la suplantación del Ca por el Pb en huesos durante una intoxicación peligrosa de plomo, en casos de avanzado plumbismo.

Los principales mecanismos de toxicidad que en la literatura se han descrito para los niveles moleculares son: 1) El bloqueo de los grupos funcionales esenciales en las biomoléculas, por la alta afinidad que tienen los cationes metálicos por los sulfhidrilos de las proteínas, ocasionando su desnaturalización; 2) El desplazamiento del ion metálico esencial de los centros catiónicos en enzimas de importancia; 3) La formación de especies reactivas de oxígeno (ERO) por autooxidación y su capacidad de iniciar reacciones en cadena de radicales libres, modificando la conformación de biomoléculas, y de esta forma dañar irreversiblemente a los carbohidratos, así como a los ácidos desoxirribonucleicos (ADN), las proteínas o lípidos.

Ciertos EIPT funcionan además como “venenos” metabólicos, ya que pueden reaccionar e inhibir una serie de sistemas enzimáticos; por ejemplo, algunos iones como Hg^{2+} , Cd^{2+} y Ag^+ forman complejos inespecíficos en la célula, lo que produce efectos tóxicos para cualquier función biológica. Sin embargo, elementos como Hg, As, Sn, Tl y Pb, pueden llegar a formar iones organometálicos liposolubles capaces de penetrar por las membranas y acumularse en las células. Entre los elementos metálicos más tóxicos se deben considerar el Pb, Hg y As. Los EIPT pueden actuar de forma aditiva cuando están presentes junto con otros o actuar independientemente, ser antagonistas o sinérgicos. Además, son influidos por el pH, el tamaño de partícula, la humedad, potencial redox, materia orgánica presente, capacidad de intercambio catiónico, y sulfuros ácidos volátiles. Los iones de clase B son más tóxicos que los de tipo frontera, que a su vez son más tóxicos que los iones clase A.

Elevadas concentraciones de EIPT, como cadmio y plomo, disminuyen la productividad y los índices reproductivos de ciertos mamíferos domésticos como el ganado vacuno, afectando su sistema inmune, incrementando la susceptibilidad de estas especies a las enfermedades; además, estos elementos pueden ser responsables de alteraciones mutagénicas, carcinogénicas e incluso teratogénicas afectando sus

poblaciones. Es pertinente resaltar al Zn como un mineral traza esencial por su rol estructural, catalítico y regulatorio de la actividad celular, al cual se debe la capacidad de aumentar la resistencia del organismo a intoxicaciones por metales tóxicos como el mercurio (Hg), plomo (Pb) y cadmio (Cd), ya que el Zn induce de la síntesis de la proteína metalotioneína (MT), que posee una alta capacidad quelante para los citados metales, y la deficiencia de esta proteína en bovinos se caracteriza por afecciones en las patas, lesiones en piel, y una menor ganancia de peso, evidencia de las afectaciones producidas por los EIPT que no son regulados.

La toxicidad de los EIPT está basada en la variabilidad de su consumo temporal (pulsaciones, elevaciones o picos que ocurren después de su ingesta); también por su variabilidad geográfica; sus relaciones entre fuentes y tiempo de exposición, la presencia de receptores humanos y ecológicos, complejos o específicos, de un sitio en particular. Una exposición aguda ocurre por el consumo o ingesta de agua y alimentos o por exposición ocupacional a grandes concentraciones en poco tiempo; los síntomas pueden ser el síndrome gastrointestinal agudo, la disfunción renal, la neurotoxicidad, entre otros. Mientras que una exposición prolongada se presenta por el contacto cotidiano con pequeñas concentraciones en el agua, su ingesta, contacto por vía aérea o suelos contaminados, desarrollando distintos tipos de cáncer, hiperqueratosis, hiper e hipopigmentación de la piel -en el caso particular del arsénico-, así como inflamación crónica de las vías respiratorias, insuficiencia renal, dermatitis, síntomas neurológicos, daño reproductivo, fetotoxicidad, teratogenicidad, abortos espontáneos. Determinados EIPT presentan específicas afectaciones.

La especiación de los EIPT en suelos es más importante que la concentración total de los mismos, porque determina si están disponibles para las plantas o pueden filtrarse hacia capas más profundas. Son considerados biodisponibles cuando se liberan de los componentes del suelo hacia el agua presente y de esta forma hacia los organismos. La biodisponibilidad, o capacidad de interacción con el sistema biológico, así como la bioconcentración y la biomagnificación de los EIPT son significativamente superiores en medios acuosos que en suelos y en la atmósfera.

4. Enfoque de tipos y usos de suelo

El suelo es el material mineral no consolidado en la superficie de la tierra, sometido a la influencia de factores genéticos y ambientales; es un cuerpo natural involucrado en interacciones con la atmósfera y con los estratos que están debajo de él, influyendo en el clima y en el ciclo hidrológico del planeta, y sirve como medio de crecimiento para diversos organismos, por ser la capa superficial del manto terrestre, cuya profundidad es variable. El suelo se compone de partículas de origen mineral, así

como de organismos vivos que han sido degradados y vueltos materia orgánica, mezclados con agua y diversas sales. El suelo está formado por tres fases principales: una sólida (alrededor del 50 %); y las otras dos son líquida y gaseosa (que juntas abarcan el otro 50 %); estas fases se encuentran dispuestas en diferentes variaciones y formas, tanto en el ámbito macroscópico, como el microscópico, y así formar diferentes tipos de suelos en el mundo. Los suelos son un reactor bio-fisicoquímico que descompone el material de desecho reciclándolo dentro de él. La mayoría de sus componentes provienen de la meteorización de rocas, y por la acción de microorganismos que descomponen la materia orgánica. El suelo constituye uno de los recursos naturales más importantes; sin él, la vida vegetal en la superficie terrestre no existiría y no habría alimentos para la vida animal ni para el ser humano.

Algunos EIPT están presentes en los suelos debido a actividades antropogénicas, pero otros están presentes en formas naturales. En los suelos los EIPT pueden existir como cationes (con carga positiva), aniones (carga negativa), o especies neutras (que tienen carga cero). Su forma química afecta significativamente su sorción, solubilidad y movilidad, aprovechando que, por procesos biológicos o químicos, se transforman de una forma química a otra y que no todas son fácilmente solubles.

Para determinar los valores de referencia de los EIPT como contaminantes del suelo, la mayoría de los países utilizan los horizontes superiores que están más en contacto con la flora y fauna, y con las poblaciones humanas que se busca proteger, es decir, se considera qué tan biodisponibles se encuentran. Por ello se debe distinguir entre los niveles presentes en la naturaleza, niveles de fondo (*background*), y las contribuciones hechas por actividades específicas (fuentes antropogénicas). El grado de afectación de los suelos dependerá de las condiciones del lugar (tipo de suelo y sus propiedades) y la actividad presente en el sitio, es decir, cuál es el uso de dicho terreno (para cada unidad de suelo); se sabe que, por la industrialización, los niveles de los EIPT en suelos pueden elevarse en relación con los niveles de fondo. De las 28 unidades o categorías de suelo reconocidas por la FAO a nivel mundial, en México, por su gran complejidad geológica y diversidad de rocas existen 25 tipos, entre los cuales sobresalen 10 que constituyen el 74 % de la superficie del territorio mexicano. Se reconoce que cinco de estas variedades cubren casi cuatro quintas partes del territorio nacional: leptosoles, regosoles, calcisoles, feozems y vertisoles.

Los tipos de suelo (desde la costa hacia tierra adentro) presentes en el municipio de San Fernando, Tamaulipas, en donde se han enfocado estudios entre los años 2020 y 2022 (Figura 1 y Figura 2), son: Gleysol, Solonchak, Vertisol, Rendzina, Xerosol y Kastañozem (Gardi et al., 2014; ver Tabla 3); en gran parte se encuentran degradados por las condiciones climáticas (erosión eólica e hídrica),

así como por la deficiencia de humedad, asociadas a las actividades agropecuarias inapropiadas que se desarrollan en el municipio y al impacto que han causado las malas políticas públicas que sobre el medioambiente se han ejecutado.

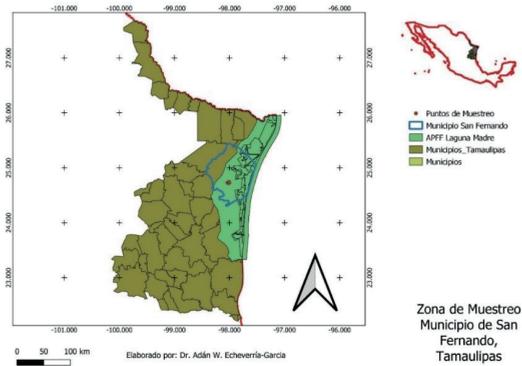


Figura 1. Municipio de San Fernando, se observa en rojo la zona de muestreo, en verde la poligonal del Área de Protección de Flora y Fauna Laguna Madre
Fuente: elaborado por el Dr. Adán W. Echeverría-García.



Figura 2. Los 10 puntos de muestreo, así como los pozos de extracción de gas natural
Fuente: elaborado por el Dr. Adán W. Echeverría-García.

Tabla 3. Características principales de los tipos de suelo presentes en San Fernando

Tipos de suelos	Características principales
Gleysol	Se observa en depresiones del terreno donde el agua subterránea llega a la superficie. En la parte más profunda tienen hierro reducido, y coloraciones grisáceas-azuladas. Sus mayores extensiones se localizan en los trópicos húmedos.
Solonchak	Suelos con alta concentración de sales más solubles que el yeso (cloruro de sodio o sulfato de magnesio), pueden moverse en el perfil a lo largo del año. Están confinados a zonas climáticas áridas y semiáridas. Limitan el crecimiento de plantas, por la cantidad de sales.
Vertisol	Suelos ricos en arcilla. Al secarse forman grietas anchas y profundas. Se encuentran en posiciones bajas del paisaje: fondos de lagos secos, cuencas de ríos, terrazas inferiores de ríos y otras tierras bajas, donde el clima muestra una alternancia entre la época húmeda y la seca.
Rendzina	Suelos con capa superficial rica en materia orgánica que descansa sobre una roca caliza; no son profundos (en promedio 10 cm), de textura arcillosa de color negro a gris, son de susceptibilidad moderada a alta a la erosión, y se encuentran en regiones semiáridas.
Xerosol	Suelos superficiales de ambientes cercanos a la aridez, poco espesor de la capa de raíces, bajo contenido en materia orgánica y textura relativamente gruesa. Pobre capacidad de almacenaje de agua. Con presencia de un horizonte cálcico o gípsico, a veces en fase pétrica.
Kastañozem	Suelos profundos sobre capas de arcilla con contenidos bajos de materia orgánica y acumulación de carbonatos de calcio en el subsuelo. Baja susceptibilidad a la erosión, de regiones semiáridas. Horizonte mineral superficial de pardo a oscuro, rico en materia orgánica, con carbonatos secundarios en el subsuelo. Su contenido en humus como su espesor suelen ser menores. Su textura es de migajón arcillosa y solo arcillosa. Comprenden suelos de pastizales o matorrales secos. La falta periódica de humedad impide alcanzar altos rendimientos agrícolas.

Fuente: elaborada con información de Andrade et al. (2012) y *Atlas de suelos de América Latina y el Caribe* (2014).

El uso del suelo del municipio de San Fernando se divide, según el Periódico Oficial del estado de Tamaulipas en 2018, en: agricultura (52 %) con sorgo como cultivo principal; los cuerpos de agua cubren 16 % del territorio y la zona urbana ocupa un 0.5 %, por lo que el municipio se sigue considerando rural. La vegetación natural en San Fernando está conformada por matorral espinoso tamaulipeco (29.5 %), pastizal (1 %) y selva (1 %) (Espinosa et al., 2012); sin embargo, dentro de estos terrenos de uso agrícola, Petróleos Mexicanos (PEMEX) ha establecido y concesionado zonas de extracción de gas natural. En Tamaulipas se cuenta con

6 788 km de ductos para gas y petróleo, que se reparten en: 4 684 km (exploración y producción), 842 km (gas) y 1 262 km (para refinación) (Aroa et al., 2017).

La legislación ambiental de México establece controles sobre posibles fuentes contaminantes para reducir al mínimo las emisiones; con la aplicación y seguimiento de normas y guías establecidas se busca la prevención de la contaminación del aire, suelo y aguas subterráneas. Se establecen concentraciones de referencia para los diferentes EIPT para diferentes usos de suelo: industrial o agrícola, residencial, comercial (NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004) previendo cualquier uso potencial, incluyendo el más sensible.

5. Métodos para análisis de EIPT en suelos

Considerando la normatividad ambiental mexicana, donde se establecen los límites máximos permisibles de los EIPT para determinados usos del suelo, se deben conocer las variaciones en su concentración en suelos mediante monitoreos cotidianos, ya que esto permitirá saber responder ante determinadas contingencias. Para ello es necesario contar con herramientas, métodos e instrumentos de medición de los EIPT. Existe una generosa diversidad de metodologías, pero en contaminación ambiental es necesario conocer la biodisponibilidad de los EIPT, por lo que el método deberá separar los iones de los granos de suelo. El más usado para determinar la concentración de EIPT en el suelo es el *Method 3050B* (USEPA, 1996), para elementos biodisponibles, cuyo valor será expresado en mg del elemento / kg de suelo (partes por millón, ppm).

Para medir la concentración de EIPT en suelos se usan instrumentos analíticos que pueden detectar pequeñas cantidades de estos elementos en las muestras analizadas, mediante la espectrometría de absorción atómica (AAS), de flama o llama (F-AAS), electrotérmica (ET-AAS) o empleando como atomizador un horno o cámara de grafito (GF-AAS). También suele utilizarse la espectrometría de masas con plasma acoplado inductivamente (ICP-MS), la emisión atómica con plasma acoplado inductivamente (ICP-AES), emisión óptica con plasma de acoplamiento inducido (ICP-OES); todos estos métodos son costosos debido al uso de diferentes instrumentos, reactivos y consumibles (Tabla 4).

Tabla 4. Diferentes instrumentos para el análisis de EIPT en suelos

Instrumentos	Ventaja	Desventaja	Notas
Espectrometría de Absorción Atómica de Flama o Llama (FAAS).	Equipos simples. Menores costos de operación. Mayor precisión. Menor habilidad en el laboratorio. Rápida y aplicable a gran número de elementos.	Método deductivo. Limitada a elementos en solución, requiere una digestión previa de la muestra. Reporta en ppm. Precisión de 1 % o menos.	Los límites de detección deben establecerse empíricamente para cada tipo de matriz analizada.
Espectrometría de Absorción Atómica electrotrémica de horno o cámara de grafito (GF-AAS).	Sensibilidad elevada. Volúmenes de muestra pequeños (entre 0.5 y 10 ul). Puede analizar directamente líquidos viscosos e incluso sólidos. Simple, rápida y aplicable a gran número de elementos. Relativamente barata. Reporta en ppb. Permite identificar y cuantificar hasta 67 elementos de la tabla periódica.	Elementos en solución, requiere digestión previa de la muestra. Interferencias químicas por la matriz. Menos reproducibilidad. Precisión del 5 al 10 %. Efectos de memoria. Pérdidas por pirólisis si el analito es volátil a temperatura de mineralización. Formación de carburos. Mayor tiempo de análisis que con llama. Debe renovar periódicamente el tubo de grafito. No determina en simultáneo varios elementos. Necesita estándares para comparar.	Se debe asegurar la validez de los datos, examinando las interferencias en cada matriz. Las interferencias pueden ser señales de fondo. Por ello, lo más conveniente es un corrector de fondo Zeeman.
Espectrometría de masas con plasma acoplado inductivamente (ICP-MS).	Carácter multielemental (abarca casi todos los elementos), alta sensibilidad, gran intervalo de linealidad y buena selectividad. Presenta el mejor límite de detección.	Es económicamente la más costosa. Interferencias espectrales por la existencia de elementos o compuestos con la misma masa/carga que el isótopo de interés.	En la actualidad los ICP-MS cuentan con sistemas para la eliminación de interferencias, como son las celdas de colisión/reacción.
Espectrometría de emisión atómica con plasma acoplado inductivamente (ICP-AES).	Buenos espectros de emisión para la mayoría de los elementos en las mismas condiciones de excitación.	Los límites de detección están en el intervalo de 1.0 ppm y la reproducibilidad en más menos $\pm 10\%$. Su principal desventaja es el posible solapamiento espectral y la influencia de radiación de fondo de otros elementos y del propio gas plasmógeno.	Óptica de alta resolución y corrección de fondo para minimizar interferencias; los análisis de trazas en presencia de exceso de determinado metal revisten dificultades.

Instrumentos	Ventaja	Desventaja	Notas
Espectrometría de emisión óptica con plasma de acoplamiento inducido (ICP-OES).	Puede determinar hasta 72 elementos simultáneamente en aproximadamente 2 minutos. No presenta interferencias de matriz por las altas temperaturas alcanzadas del plasma. Los límites de detección son iguales o mejores que AAS y puede determinar concentraciones hasta ppb sin disolución o preconcentración. El análisis es cualitativo y cuantitativo.	Disolventes orgánicos utilizados para tratar la muestra pueden extinguir el plasma. Entre más compleja es la matriz, es más probable afectar los límites de detección y requerir estrategias de calibración especiales como adición de estándares internos o materiales de referencia certificados. Es más caro que AAS.	No se obtiene información sobre estados de oxidación o compuestos en los que se encuentran los elementos.

Fuente: Willis (1977), Ramírez Medrano (2004), Zagal y Sadzawka (2007) y González et al. (2004).

6. Valores de fondo (de origen, naturales o *background*) de EIPT en suelos

El suelo es un recurso natural esencial para el sustento de la vida humana; pero con el tiempo, su degradación ha ido en constante aumento debido a la deposición de contaminantes. La concentración de fondo de EIPT en suelos vírgenes depende principalmente del tipo de lecho rocoso del que se derivó el material original. Los niveles de fondo se definen como “la concentración de un contaminante que está presente constantemente en el ambiente de la región y que no ha sido influenciada por las diversas actividades humanas”, pues muchos EIPT son constituyentes naturales del mismo suelo, como resultado del proceso geológico de la deposición natural que forma el suelo de los diferentes ecosistemas, capa sobre capa, con el paso del tiempo, y que no provienen de fuentes de contaminación específicas.

Los valores de fondo de un determinado sitio deben ser registrados para cada ecosistema investigado, ya que varían en tipo de suelo, según la profundidad, vegetación y región del país. Hay zonas donde los niveles de fondo naturales para algunos EIPT exceden los valores asentados en las normas ambientales, pero sigue siendo su estado natural. La adquisición de datos adecuados sobre las concentraciones de fondo debe evaluarse para determinar si las concentraciones tienen un origen antropogénico o natural.

El concepto ‘fondo geoquímico’ se introdujo para diferenciar entre concentraciones normales y anormales de elementos, o desviaciones de los patrones geoquímicos normales para una zona determinada. Para diferenciar entre valor de fondo y la anomalía, el término umbral fue introducido como el límite superior

de la fluctuación normal de fondo (Tabla 5). El vanadio es un metal traza que se encuentra de manera natural en suelo y agua; es el mineral que ocupa el puesto 22 de abundancia, con una concentración media de 150 mg/kg.

Tabla 5. Concentración de fondo de EIPT en suelos

Elementos	México ^a	EE.UU. ^c	Unión Europea ^d
Aluminio (Al)	62289	9944-100000	
Antimonio (Sb)	1.1	0.7-3.6	
Arsénico (As)	4.94	1.4-1.6	
Bario (Ba)	180.1	48-1043	
Be (Berilio)	<LD	0.3-2.3	
Cadmio (Cd)	2.5	0.-0.9	0.08-1.23
Cromo (Cr) ^b	275	13.8-121.6	5.0-68
Cobalto (Co)	7.5	1.7-18	
Cobre (Cu)	30.7	5.0-53	2.0-32
Manganeso (Mn)	3296	1112	
Mercurio (Hg)	<LD		0.02-0.29
Molibdeno (Mo)	6.9		
Níquel (Ni)	23.1	6.0-48	3.0-48
Plata (Ag)	1.1	0.5-1.2	
Plomo (Pb)	9.75	5.0-39	10.0-73
Selenio (Se)	6.2	0.2-1.9	
Talio (Tl)	<LD		
Vanadio (V)	57.5	11-168	
Zinc (Zn)	17.95	12-113	6-121

a) 23 estados de México; b) para cromo hexavalente; c) para 48 estados de Estados Unidos de América; d) 17 países de Europa.

Fuente: Beyer (1990), Crommentuijn et al. (2000), DTIV (2000), Lin et al. (2002), USEPA (2003a), Chen et al. (2005), McGrath y Zhao (2006), Utermann et al. (2006), Carlon (2007), Gutiérrez Ruiz et al. (2009), Morton-Bermea et al. (2009a), Wei y Yang (2010), Luo et al. (2012), Esmaeli et al. (2014), Lame y Marling (2014), Ihl et al. (2015).

7. Presencia de EIPT en suelos

Los EIPT pueden encontrarse en materiales de desecho, que en el futuro probablemente se incorporarán al suelo. El resultado final es una acumulación en la biota, seguida de una transferencia a los humanos a través de la cadena alimentaria (bioacumulación), lo que genera un riesgo potencial para la salud humana. Las diversas actividades humanas como la agricultura, ganadería, comercio, urbanización y mineralización generan una gran cantidad de residuos que incorporan al ambiente elementos como el Fe, Mn, Mg, Cu y Zn. En las áreas agrícolas, la adición de metales al sistema se debe principalmente a los fertilizantes comerciales. El conocimiento de la concentración total de EIPT en el suelo ayuda a su caracterización, la construcción de bancos de referencia y la monitorización continua de áreas contaminadas. Es sabido que entre las principales fuentes de contaminación antropogénica están la minería y la metalurgia, como proveedores de elementos metálicos; la agricultura en el uso de diferentes fertilizantes, y los vehículos automotores que aportan al suelo Pb, Cr y Zn.

En México existen reportes de la presencia de EIPT en ríos, lagos, cultivos, suelos y aire de zonas urbanas, así como en ambientes costeros y marinos, donde se ha detectado la acumulación de metales tóxicos en tejidos de peces y moluscos de consumo humano. El conocimiento acerca del impacto de los EIPT en suelos contempla patrones de distribución por encima de los límites permisibles establecidos por un país, considerándolos inadecuados para la agricultura, para de ahí relacionarlos con otros usos de suelo (doméstico, recreativo, industrial), considerando el enfoque toxicológico respecto al daño sobre la salud de organismos del suelo, plantas y animales. Generalmente se utilizan valores guía propuestos por países industrializados (Estados Unidos de América, Canadá, Reino Unido, Unión Europea, Australia), aunque difieren por regiones y entre países, de acuerdo con las condiciones ecológicas y políticas de cada nación, cultura y desarrollo económico e industrial. Se han propuesto métodos estandarizados y procedimientos experimentales para la medición de los niveles de concentración, desarrollando estándares ecológicos, al mismo tiempo que se ha descrito una nomenclatura de valores permisibles que actúan como límites o guías, aceptada mundialmente (Tabla 6).

Tabla 6. Nomenclatura de valores límites de EIPT

Acrónimo	Nombre	Descripción
NOEC	Consecuencias Ecológicas No Observadas	Concentración más alta en una prueba, con una respuesta media que no difiere significativamente de la respuesta media del control. Post análisis de varianza.
NOEL	Nivel sin efecto (adverso) observado	La dosis más alta que no produce efecto tóxico.
LKE	Más bajo efecto o Nivel Conocido.	Es el nivel de concentración que puede producir efecto.
LOEC	Concentración del más bajo efecto observado	Concentración de ensayo, más baja que tiene una respuesta media que no difiere significativamente de la del control. Post análisis de varianza.
LOAEC	Concentración de más bajos efectos adversos observados	Concentración mínima en la que se pueden apreciar efectos adversos.
LOAEL	Menor nivel de efecto adverso observado.	Dosis más baja ensayada en una especie animal con efectos adversos.
MCA	Cantidad Máxima Acumulable	Cantidad máxima que se permite acumular.
PAA	Aplicación Anual Permitida	Lo más que se puede permitir al año.
MAC	Máxima Concentración Admisible	Concentración máxima de tóxico que no debe ser sobrepasada.
MAL	Máxima Carga Admisible	El nivel de concentración que puede ser admisible en un sitio.
MPL	Nivel Máximo Permisible	Valor de la combinación de concentración y tiempo, para agentes químicos y tóxicos ambientales, por encima del cual la exposición es perjudicial al hombre.
ATL	Nivel de Acción Requerida	Considera la concentración por arriba de la cual las medidas de remediación y tratamiento son necesarias.
EEL	Nivel de Exposición Ambiental	Concentración (o cantidad, o tiempo, o ambos) de una sustancia que incide sobre cualquier elemento del medio.
TLV	Valor Umbral Límite	Niveles permisibles de agentes químicos o físicos en el ambiente.
EILs	Niveles de investigación ecológicos	Desarrollados para EIPT seleccionados y sustancias orgánicas, son aplicables a la evaluación de riesgo para ecosistemas terrestres.

Acrónimo	Nombre	Descripción
ESLs	Niveles de detección ecológica	Desarrollados para compuestos de hidrocarburos derivados del petróleo seleccionados, y de hidrocarburos totales de petróleo (TPH), aplicables para evaluar riesgo en ecosistemas terrestres.
GILs	Niveles de investigación de aguas subterráneas	Concentración de contaminante en aguas subterráneas, por encima del cual se requiere mayor investigación o una respuesta.
HILs	Niveles de investigación de la salud	Desarrollados para amplia gama de EIPT y sustancias orgánicas. Aplicables para la evaluación de riesgo en la salud humana.

Fuente: Repetto y Sanz (1995), Bachmann et al. (1999), Crane y Newman (2000), USEPA (2003), Kabata-Pendías (2011), NEPM (2013).

8. Presencia de EIPT en zonas de extracción de hidrocarburos (HCs)

México inició la producción de petróleo y la construcción de refinerías desde principios de 1920. La prospección petrolera en Burgos se inicia a fines de la década de 1920-1930 por compañías extranjeras. PEMEX inició su exploración en 1939 y es hasta abril de 1945 cuando descubre gas en areniscas del pozo Misión-1, ubicado a 30 km al noroeste de Reynosa, Tamaulipas. En sitios de exploración, extracción, refinación y almacenamiento de petróleo, el subsuelo se contamina por fugas de tanques, válvulas y tuberías, especialmente por hidrocarburos, con concentraciones detectadas de hasta 130 000 mg/kg de hidrocarburos totales de petróleo (TPH).

Las etapas que componen el procesamiento del petróleo son: explotación, transporte, refinamiento, almacenamiento y uso. Las alteraciones ambientales que cada una provoca varían, por lo que en las zonas de actividades extractivas es importante considerar la contaminación que ocurre por el almacenamiento. El petróleo es una mezcla muy compleja de cientos de compuestos químicos y diferentes EIPT; sus características y la proporción de sus constituyentes varían en función de su origen geológico y geográfico. Por su propia naturaleza, y la de sus productos y derivados, el petróleo es capaz de reincorporar una muy pequeña fracción a los ciclos biogeoquímicos. Cuando sus cantidades en el ambiente superan las que pueden ser recicladas, se genera un impacto negativo en el ambiente y el sitio se encuentra contaminado, pues altas concentraciones de sus componentes pueden dañar la salud. Por ello los derrames de petróleo y los accidentes en las zonas de extracción de gas natural generan residuos peligrosos. Bojórquez-Sánchez (2018) señala que los EIPT Fe, Ni, V y Zn son componentes inorgánicos presentes en los crudos, siendo Ni y V los más abundantes; Dótor-Almazán et al. (2021) indican

que entre los EIPT que se encuentran asociados a los HCs sobresalen el V y el Cd, aunque su presencia en diferentes ambientes también puede derivarse de efluentes antropógenos que se descargan en ellos, incluidas las aguas residuales domésticas de las áreas urbanas y las emisiones atmosféricas de la quema de combustibles fósiles, ambos metales se presentan a menudo con la extracción de los HC al estar unidos estructuralmente a compuestos orgánicos en abundancia y conocidos como compuestos organometálicos. Los EIPT adsorbidos por el material particulado del suelo son conducidos principalmente por la lluvia.

Dótor-Almazán et al. (2021) analizaron 27 muestras de sedimentos superficiales de la plataforma continental de Tamaulipas para determinar la distribución espacio-temporal de V y Cd (durante la primavera-verano 2016; y el verano 2017), registrando concentraciones promedio de V 99000 ± 18000 mg/kg, señalándolas como similares a los valores informados anteriormente para el área, mientras que las concentraciones promedio de Cd reflejan sedimentos no contaminados al nivel de la superficie de la plataforma, sugiriendo que las variaciones espacio-temporales de V están relacionadas con la presencia de reservorios de hidrocarburos, actividades de extracción, emisiones naturales, material particulado continental, aportes antropogénicos del sur del golfo de México y desechos del norte.

En las zonas terrestres de México, es importante la cantidad de derrames de hidrocarburos que provienen de su transporte, puesto que producen impactos negativos al suelo. También es necesario reconocer el nivel de industrialización en determinados lugares del país, por la cantidad de hidrocarburos y otras sustancias químicas que pudieran requerir, lo que aumenta la posibilidad de un mayor número de derrames, siendo cada vez más urgente el acopio de información química y medioambiental precisa que pueda minimizar los derrames y la remediación inmediata de los suelos afectados.

Gas-shale. El gas natural de lutita se ha convertido en uno de los principales combustibles utilizados a nivel mundial. La revolución del *gas-shale* se dio en Estados Unidos de América, y desde hace pocas décadas México ha asumido el reto de explotar dicho hidrocarburo, mediante la concesión a empresas petroleras en gran parte de las regiones con alto potencial de gas de lutita, como la región Tampico-Misantla que comprende los siguientes municipios: Burgos, Casas, Cruillas, González, Jiménez, Llera, Padilla, San Carlos, San Nicolás, Victoria y Xicoténcatl, donde es posible acceder a su explotación empleando las tecnologías del *fracking* y la perforación horizontal. Esta importante demanda de *gas-shale*, en el mercado de los hidrocarburos no convencionales, ocurre por el declive en las explotaciones de los yacimientos de gas y petróleo convencional. Ya que desde los años noventa, el gas natural se ha convertido en uno de los principales combustibles a utilizarse por su

bajo costo, e incluso es menos contaminante que otros hidrocarburos. Además de su relativa disponibilidad, que lo ha convertido en materia prima para la petroquímica. Este combustible se obtiene de yacimientos convencionales y no convencionales y se estima que será el que mayor penetración registrará como aporte de energía primaria.

México es deficitario en la producción de gas natural, pues requirió importar 29.9 mil millones de metros cúbicos en 2015 para abastecer su consumo interno, pero cuenta con reservas potenciales en cinco provincias petroleras: Sabinas, Burro-Picachos, Burgos MZ, Tampico-Misantla y Veracruz, en donde se estimaron recursos técnicamente recuperables de 60.2 mil millones de petróleo crudo equivalente (De la Vega, 2013). La Cuenca de Burgos se consolidó en el 2011 como la más importante productora de gas natural no asociado en el país. En Tamaulipas se encuentra la mayor cantidad de recursos de gas-*shale*, y una de las provincias petroleras con mayores reservas de aceite fue Tampico-Misantla con 30.7 miles de millones de barriles de crudo equivalente.

Para la extracción del gas-*shale*, durante el *fracking*, se han identificado más de 2 500 productos y, al menos, 750 tipos diferentes de químicos que tienen que ser monitoreados constantemente para controlar su vertido e incorporación a los suelos que rodean las zonas de extracción.

El informe *Impacto Ambiental del Sistema de Fracturación Hidráulica* para la extracción de gas no convencional, señala que más del 25 % de las sustancias utilizadas en esta actividad pueden causar cáncer y mutaciones, el 37 % pueden afectar al sistema endocrino, más del 50 % causan daños en el sistema nervioso y casi el 40 % pueden provocar alergias. La fractura hidráulica -*fracking*- incrementa la permeabilidad de la roca permitiendo la liberación del gas, a través de reacciones químicas y el empleo de presión impulsada mediante la inyección de fluidos. El líquido de perforación se combina en el proceso de fractura con sustancias, como EIPT y metano, dando pie a reacciones químicas imprevistas que son nocivos para la salud humana y la de otros organismos.

Algunos monitoreos indican que las afectaciones al ambiente debido a emergencias ambientales en México durante el periodo 1999-2001, principalmente ocurrieron en el suelo y fueron considerables; de estas, alrededor de un 90 % fue por fallas humanas. También se ha documentado a Tamaulipas como una de las entidades con una contaminación mediana, solamente por debajo de Tabasco, y de las cuatro entidades más contaminantes Nuevo León, CDMX (antes Distrito Federal), el Estado de México y Veracruz, que ha sido catalogada como la entidad con mayor producción de contaminantes derivada de sus actividades industriales.

Para extraer gas natural se suele emplear la técnica de fracturación hidráulica o *fracking*, que requiere de grandes cantidades de agua; 98 % del fluido

inyectado es agua y 2 es de productos químicos. Si se considera todo el proceso, el consumo de agua aumenta de 10 % a 30 % en el lugar. Por lo anterior, el uso y la disponibilidad del agua se ha vuelto uno de los temas más preocupantes y polémicos en la extracción del gas-*shale*, pues la cantidad oscila entre los 9 800 litros y sobrepasa los 36 millones de litros por cada pozo. Si se considera que el principal uso del agua en Tamaulipas es agrícola (con el 54 %), seguido por la generación de energía (34 %), la cantidad de agua destinada al *fracking* resulta en un problema de disponibilidad. Dado que la cantidad de agua empleada por pozo de extracción es de aproximadamente 36 millones de m³ y la consumida en Tamaulipas es de cerca de 6 363.8 millones de m³, el agua a utilizarse en la fractura hidráulica podría cubrir hasta 177 pozos por año, sin considerar las sequías que pudieran presentarse.

Debido a que la industria del gas no puede manejar las grandes cantidades de aguas residuales originadas por la fractura hidráulica, es frecuente que se empleen pozos de inyección (también llamados pozos letrina) para deshacerse del agua contaminada. Estos pozos pueden desestabilizar las fallas geológicas y provocar sismos, así como incorporar contaminantes a los ecosistemas del entorno. Por todo lo anterior, los peligros que tiene la extracción de gas para el ambiente se pueden resumir en la contaminación de los acuíferos con los fluidos de la fracturación y con el propio gas que se pretende extraer. Cada perforación necesita unos 200 mil m³ de agua para la fracturación hidráulica. Teniendo en cuenta que los aditivos químicos suelen suponer en torno al 2 % del total del agua introducida, esto supone que en cada pozo se inyectan 4 mil toneladas de productos químicos altamente contaminantes.

De los EIPT presentes en zonas de extracción de HCs, el vanadio es uno de los que presenta mayor concentración en el petróleo, por lo que es utilizado como indicador de contaminación en zonas petroleras. Bojórquez-Sánchez et al. (2018) evaluaron el aporte de elementos relacionados con las actividades petroleras, analizando contenidos de V en dos núcleos de sedimentos, reconociendo que los ecosistemas cercanos a zonas de actividad petrolera están expuestos a contaminantes por derrames de hidrocarburos; además reportaron valores de V para sus dos núcleos en un rango entre 42-136 mg/kg. Alrededor del mundo se han encontrado altos contenidos de V en petróleos crudos, con valores que alcanzan hasta los 1 580 mg/kg; estos valores de V en crudo están determinados por las condiciones ambientales en donde la roca madre fue depositada; su aumento en el sedimento de estas zonas con buena asociación con elementos de origen terrígeno es producto del intemperismo de las rocas existentes. Durante el análisis de las emulsiones de crudo y agua provenientes del accidente de la plataforma petrolera *Deepwater Horizon*, en el 2010, se documentó que estas llegaron a la zona de marismas presentando concentraciones de Ni y

V en cantidades mucho menores que las que se encontraron en el mismo crudo, probablemente debido a la liberación de los metales a la fracción disuelta.

Villacreces (2013) señala que concentraciones relativamente altas de vanadio pueden encontrarse en ciertos petróleos y depósitos de carbón, y presentan un riesgo de contaminación importante si explotan; asumiendo que la ceniza de la combustión de gas natural y petróleo a menudo contiene más del 10 % de vanadio, el suelo cercano a los sitios de extracción puede contener altos valores de este elemento, por lo que la concentración de V en suelos de zonas de extracción de HCs puede ser utilizada como un indicador de contaminación ambiental. Bojórquez-Sánchez et al. (2018) determinaron que hay una asociación de Ni con elementos terrígenos: Al, Fe, Co, Li, y Zn, mientras que el V no se asoció con estos elementos. Villacreces (2013) reitera que los valores de concentración de V, que pueden indicar contaminación de fuentes relacionadas con la explotación petrolera, se estiman en 2 µg/L para aguas y 100 mg/kg para los suelos, aceptando que existe una influencia de la incorporación de residuos, así como la temperatura del suelo sobre la cantidad de EIPT que puede contener la materia orgánica; por ejemplo, la alta precipitación podría ser responsable de la transferencia de EIPT retenidos en la materia orgánica soluble hacia el suelo. El vanadio a menudo se acumula en raíces y semillas de las plantas, tales como los cereales, que pueden llegar a contener concentraciones de vanadio nocivas para la salud.

Los valores promedio de concentración de los EIPT analizados en 180 muestras de suelos de San Fernando, recogidas durante el presente estudio, no rebasaron los límites establecidos por la normatividad mexicana; sin embargo, en cinco muestras individuales (el 2.78 % del total de muestras) el vanadio (V) sí rebasó los 78 mg/kg presentes en suelos de uso agrícola señalados en la NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004, con valores de 94.07, 88.50, 81.12, 89.06 y 82.45 mg/kg para estos suelos de San Fernando, donde el cultivo dominante es el sorgo que se siembra de manera tecnificada, conviviendo con la extracción de gas natural.

9. Conclusión

Es necesario que en las investigaciones sobre contaminación ambiental prevalezca el término de “elementos inorgánicos potencialmente tóxicos”, EIPT, para sustituir el de “metales pesados”, y utilizar la clasificación de iones clase A, B y *borderline* (frontera). La concentración de la mayoría de los EIPT de interés medioambiental en el suelo, varían de dos a tres órdenes de magnitud en función del material matriz del que se derivó, lo que debe ser considerado en los estudios de contaminantes inorgánicos del suelo.

Respecto a los valores de vanadio, Villacreces (2013) reporta que 100 mg/kg en suelo indica contaminación, Bojórquez-Sánchez et al. (2018) exponen un rango promedio de 78-81 mg/kg y Dótor-Almazán et al. (2012) indican que son 99 000 mg/kg, pero estos trabajos utilizan muestras de sedimentos marinos. Los datos obtenidos para suelos agrícolas del municipio de San Fernando, Tamaulipas, al menos en cinco muestras individuales pueden considerarse como contaminadas por vanadio con valores de 94.07, 88.50, 81.12, 89.06 y 82.45 mg/kg.

En México, aún no hay una normatividad para concentraciones límites de EIPT en suelos con actividad de extracción de gas natural. Esta investigación contribuye en su generación.

10. Referencias

- Alloway, B. J. y Jackson, A. P. (1991). The behavior of heavy metals in sewage sludge amended soils. *The Science of the Total Environment*, 100, 151-176.
- Arias, F. A. (2003). *Manual de técnicas analíticas para la determinación de parámetros fisicoquímicos y contaminantes marinos (aguas, sedimentos y organismos)*. Instituto de Investigaciones Marinas y Costeras, José Benito Vives de Andrés - INVEMAR.
- Bachmann, G., Seidler, K. y Choudhury, K. (1999). *Threshold values in the context of European soil protection policies* (Reporte 1-10-1999). 1st European Soil Forum, Berlin, Germany. https://www.ecologic.eu/sites/default/files/publication/2016/944_european_soil_protection.pdf
- Baderna, D., Lomazzi, E., Pogliaghi, A., Ciaccia, G., Lodi, M. y Benfenati, E. (2015). Acute phytotoxicity of seven metals alone and in mixture: Are Italian soil threshold concentrations suitable for plant protection? *Environmental Research*, 140, 102-111. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2015.03.023>
- BEM Systems, Inc. (2002). *Characterization of ambient levels of selected metals and cPAHs in New Jersey soils: Year III - Rural areas of New Jersey Highlands, Valley and Ridge, and Coastal Plain Physiographic Provinces*. New Jersey Department of Environmental Protection.
- Beyer, W. N. (1990). Evaluating soil contamination. *Fish and Wildlife Service. Biological Report*, 90(2), 1-25.
- Bojórquez-Sánchez, S., Marmolejo-Rodríguez, A. J., Ruiz-Fernández, A. C., Sánchez-González, A., Sánchez-Cabeza, J.-A., Bojórquez-Leyva, H. et al. (2018). Enriquecimiento natural de níquel y vanadio en núcleos de sedimento cercanos a sitios de extracción de crudo en el golfo de México. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 34(4), 713-723. <https://doi.org/10.20937/RICA.2018.34.04.12>
- Briceno, M. (2012). *Avances en el empleo de la espectrometría de absorción atómica con atomización electrotrémica: Especiación no cromatográfica* [Tesis de doctorado, Universidad de Murcia].

Repositorio DIGITUM. Biblioteca Universitaria. <https://digitum.um.es/digitum/handle/10201/27765>

- Bustamante, J. J., Chaparro, A. L. y Peláez, M. J. (2015). Impacto de las actividades antrópicas derivadas de la industria petrolera en relación con la presencia de metales pesados en la ganadería bovina colombiana. *Revista de Toxicología*, 32(2), 127-130.
- Camacho-Tamayo, J. H., Rubiano S. y Hurtado, M. P. (2014). Espectroscopia de reflectancia difusa por infrarrojo cercano (NIR) para la predicción de carbono y nitrógeno de un oxisol. *Agronomía Colombiana*, 32(1), 86-94. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=9463134>
- Carlou, C. (Ed.). (2007). *Derivation methods of soil screening values in Europe: A review and evaluation of national procedures towards harmonization*. European Commission, Joint Research Centre, Ispra. https://esdac.jrc.ec.europa.eu/ESDB_Archive/eusoils_docs/other/EUR22805.pdf
- Chen, T. B., Zheng, Y. M., Lei, M., Huang, Z. C., Wu, H. T., Chen, H. et al. (2005). Assessment of heavy metal pollution in surface soils of urban parks in Beijing, China. *Chemosphere*, 60(4), 542-551. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0045653505000846>
- Crane, M. y Newman, M. C. (2000). What level of effect is a no observed effect? *Environmental Toxicology and Chemistry*, 19(2), 516-519.
- Crommentuijn, T., Sijm, D., de Bruijn, J., van den Hoop, M., van Leeuwen, K. y van de Plassche, E. (2000). Maximum permissible and negligible concentrations for metals and metalloids in the Netherlands, taking into account background concentrations. *Journal of Environmental Management*, 60(1), 121-143. <https://doi.org/10.1006/jema.2000.0354>
- Díaz-Barriga, F. (1998). *Metodología de identificación y evaluación de riesgos para la salud en sitios contaminados*. Universidad Nacional Autónoma de México.
- De la Rubia, J. M. (2001). *Determinación de aluminio en líquidos concentrados de hemodiálisis por espectrofotometría de absorción atómica* [Tesis de doctorado, Universidad Complutense de Madrid]. Repositorio UCM.
- Dutch Target and Intervention Values. (2000). *Circular on target values and intervention values for soil remediation. Annex A: Target values, soil remediation intervention values and indicative levels for serious contamination*. Ministerie van Volkshuisvesting. https://support.esdat.net/Environmental%20Standards/dutch/annexs_i2000dutch%20environmental%20standards.pdf
- Dótor-Almazán, A., Gold-Bouchot, G., Lamas-Cosío, E., Huerta-Díaz, M. A., Ceja-Moreno, V., Ocegüera-Vargas, I. et al. (2021). Vanadium and cadmium in shallow marine sediments: Spatial and temporal behavior in the Tamaulipas continental platform, Gulf of Mexico, Mexico. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, 108, 30-36. <https://doi.org/10.1007/s00128-021-03213-8>

- Duffus, J. Z. (2002). Heavy metals: A meaningless term? *Pure and Applied Chemistry*, 74(5), 793-807.
- Ene, A., Bosneaga, A. y Georgescu, L. (2010). Determination of heavy metals in soils using XRF technique. *Romanian Journal of Physics*, 55(7-8), 815-820.
- Esmacili, A., Moore, F., Keshavarzi, B., Jaafarzadeh, N. y Kermani, M. (2014). A geochemical survey of heavy metals in agricultural and background soils of the Isfahan industrial zone, Iran. *Catena*, 121, 88-98. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0341816214001271>
- Flores, M. A., Torras, S. y Téllez Gutiérrez, R. (2004). *Medidas de mitigación para uso de suelos contaminados por derrames de hidrocarburos en infraestructura de transporte terrestre* (Publicación Técnica No. 257). Secretaría de Comunicaciones y Transportes, Instituto Mexicano del Transporte.
- González-Chávez, M. C. A. (2005). Recuperación de suelos contaminados con metales pesados utilizando plantas y microorganismos rizosféricos. *Terra Latinoamericana*, 23(1), 29-37.
- González, E., Ahumada, R., Medina, V., Neira, J. y González, U. (2004). Espectrofotometría de absorción atómica con tubo en la llama: Aplicación en la determinación total de cadmio, plomo y zinc en aguas frescas, agua de mar y sedimentos marinos. *Química Nova*, 27(6), 873-877.
- Gutiérrez-Ruiz, M. E., Ceniceros-Gómez, A., Luna-González, L., Morales-Manilla, L. M., Romero, F., Martínez-Jardines, L. G. et al. (2009). *Elaboración de un mapa regional de valores de fondo de elementos potencialmente tóxicos (EPT) de México*. Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Geografía.
- Hodson, M. A. (2004). Heavy metals: Geochemical bogey men? *Environmental Pollution*, 129, 341-343.
- Ihl, T., Bautista, F., Cejudo Ruíz, F. R., Delgado, M. C., Quintana Owen, P. y Goguitchaichvili, A. (2015). Concentration of toxic elements in topsoils of the metropolitan area of Mexico City: A spatial analysis using ordinary kriging and indicator kriging. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 31(1), 47-62. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=37036860004>
- Iturbe, R., Flores, R. M., Flores, C. R. y Torres, L. G. (2024). TPH-contaminated Mexican refinery soil: Health risk assessment and the first year of changes. *Environmental Monitoring and Assessment*, 91(1-3), 237-255. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/14969447/>
- Ji, Y., Feng, Y., Wu, J., Zhu, T., Bai, Z. y Duan, C. (2008). Using geoaccumulation index to study source profiles of soil dust in China. *Journal of Environmental Sciences*, 20(5), 571-578. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/18575110/>
- Kabata-Pendias, A. (2011). *Trace elements in soils and plants* (4th ed.). CRC Press Taylor and Francis Group.

- Lamé, F. y Maring, L. (2014). *Into Dutch soils: A swift overview of how the Dutch manage their soils: A source of inspiration for your own practice*. Rijkswaterstaat.
- Lin, Y., Teng, T. y Chang, T. (2002). Multivariate analysis of soil heavy metal pollution and landscape pattern in Changhua county in Taiwan. *Landscape and Urban Planning*, 62, 19-35.
- Luo, X., Yu, S., Zhu, Y. y Li, X. (2012). Trace metal contamination in urban soils of China. *Science of the Total Environment*, 421-422, 17-30.
- Madrid, L. (2010). Heavy metals: Reminding a long-standing and sometimes forgotten controversy. *Geoderma*, 155(s 1-2), 128-129. https://www.researchgate.net/publication/256716271_Heavy_metals_Reminding_a_long-standing_and_sometimes_forgotten_controversy
- Makino, T., Luo, Y., Wu, L., Sakurai, Y., Maejima, Y., Akahane, I. et al. (2010). Heavy metal pollution of soil and risk alleviation methods based on soil chemistry. *Pedologist*, 53(3), 38-49. https://www.jstage.jst.go.jp/article/pedologist/53/3/53_KJ0000772728/_article/-char/en
- Maldonado, V. M., Rubio Arias, H. O., Quintana, R., Saucedo, R. A., Gutierrez, M., Ortega, J. A. et al. (2008). Heavy metal content in soils under different wastewater irrigation patterns in Chihuahua, Mexico. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 5(5), 441-449. <https://www.mdpi.com/1660-4601/5/5/441>
- McGrath, S. P. y Zhao, F. J. (2006). *Ambient background metal concentrations for soils in England and Wales* (Report: SC050054/SR). Environment Agency Science. <https://assets.publishing.service.gov.uk/media/5a7c583340f0b6321db3890e/scho1106blpv-e-e.pdf>
- McLean, J. E. y Bledsoe, B. E. (1992). *Behavior of metals in soils*. EPA Ground Water Issue.
- Morton-Bermea, O., Hernández, E., Martínez-Pichardo, E., Soler-Arechalde, A. M., Lozano Santa-Cruz, R., González-Hernández, G. et al. (2009). Mexico City topsoils: Heavy metals vs. magnetic susceptibility. *Geoderma*, 151(3-4), 121-125.
- Neiboer, E. y Richardson, D. H. S. (1980). The replacement of the nondescript term “heavy metals” by a biologically and chemically significant classification of metal ions. *Environmental Pollution Series B*, 1, 3-26.
- National Environment Protection Measure (NEPM). (2013). *Guideline on investigation levels for soil and groundwater*. Federal Register of Legislative Instruments F2013C00288. Office of Parliamentary Counsel, Australian Government. Canberra, Australia.
- Ramírez, A. (2004). *Desarrollo, validación de un método analítico para la determinación de residuos metálicos de disparo de arma de fuego mediante ICP-OES y su aplicación en la química forense* [Tesis de maestría, Universidad Autónoma de Nuevo León]. Repositorio Institucional UANL. <http://eprints.uanl.mx/6667/1/1080123957.PDF>
- Reimann, C. y Garrett, R. G. (2005). Geochemical background, concept and reality. *Science of the Total Environment*, 350, 12-27. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2005.01.047>

- Repetto, M. y Sanz, P. (1995). *Glosario de términos toxicológicos. Versión española de las recomendaciones de IUPAC-1993*. Asociación Española de Toxicología.
- Rubio-Armendáriz, C. (2003). *Ingesta dietética de contaminantes metálicos (Hg, Pb, Cd, Fe, Cu, Zn y Mn) en la Comunidad Autónoma Canaria. Evaluación toxicológica* [Tesis de grado, Universidad de la Laguna]. Repositorio Institucional RIULL. <https://riull.ull.es/xmlui/handle/915/10794>
- Sanders, P. F. (2003). *Ambient levels of metals in New Jersey soils*. Environmental Assessment and Risk Analysis Element.
- Secretaría de Economía. (2014). *Panorama minero de los estados de la República Mexicana*. Documentos para 29 entidades federativas. Servicio Geológico Mexicano
- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. (2004). *Norma Oficial Mexicana que establece criterios para determinar las concentraciones de remediación de suelos contaminados por arsénico, bario, berilio, cadmio, cromo hexavalente, mercurio, níquel, plata, plomo, selenio, talio y/o vanadio (NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004)*.
- Ulmanu, M., Anger, I., Gament, E., Mihalache, M., Plopeanu, G. y Ilie, L. (2011). Rapid determination of some heavy metals in soil using an X-ray fluorescence portable instrument. *Research Journal of Agricultural Science*, 43(3), 235-241.
- United States Environmental Protection Agency (USEPA). (2003a). *Guidance for developing ecological soil screening levels (Eco-SSLs)*. Office of Solid Waste and Emergency Response.
- _____. (2003b). *Guidance for developing ecological soil screening levels (Eco-SSLs). Attachment 1-4: Review of background concentrations for metals*.
- _____. (2007). *Framework for metals risk assessment*. EPA 120/R-07/001. Office of the Science Advisor.
- Utermann, J., Düwel, O. y Nagel, I. (2006). Contents of trace elements and organic matter in European soils. En B. M. Gawlik y G. Bidoglio. (Eds.), *Background values in European soils and sewage sludges* (pp. 5-44). European Communities.
- Villacreces, L. A. (2013). *Validación de la concentración de vanadio como indicador de contaminación de origen petrolero* [Tesis de maestría, Universidad de las Fuerzas Armadas, Ecuador]. Repositorio ESPE.
- Voica, C., Dehelean, A., Iordache, A. y Geana, I. (2012). Method validation for determination of metals in soils by ICP-MS. *Romanian Reports in Physics*, 64(1), 221-231.
- Wang, X. y Qin, Y. (2007). Some characteristics of the distribution of heavy metals in urban topsoil of Xuzhou, China. *Environmental Geochemistry and Health*, 29, 11-19. <https://doi.org/10.1007/s10653-006-9052-2>
- Wei, B. y Yang, L. (2010). A review of heavy metal contaminations in urban soils, urban road dusts and agricultural soils from China. *Microchemical Journal*, 94(2), 99-107. https://www.researchgate.net/publication/222697600_A_Review_of_Heavy_

Metal_Contaminations_in_Urban_Soils_Urban_Road_Dusts_and_Agricultural_Soils_From_China

- Willis, R. D. (1977). *Proton induced X-ray emission (PIXE) and applications to elemental analysis*. [Tesis de doctorado, Duke University, USA]. Duke Digital Repository.
- Wuana, R. A. y Okieimen, F. E. (2011). Heavy metals in contaminated soils: A review of sources, chemistry, risks and best available strategies for remediation. *International Scholarly Research Notice*, 2011(1), 402647. <https://doi.org/10.5402/2011/402647>
- Zagal, E. y Sadzawka, A. (2007). *Protocolo de métodos de análisis para suelos y lodos*. Concepción: Universidad de Concepción, Facultad de Agronomía. Gobierno de Chile. https://www.sag.gob.cl/sites/default/files/METODOS_LODOS_SUELOS.pdf

Capítulo 4

Dispositivos y sensores para uso en zonas de extracción de hidrocarburos

*Johnatan Ahisamac Salazar Pérez**

Adán W. Echeverría-García

Hugo Alberto Solís Martínez¹

Introducción

A lo largo de la historia, el ser humano ha buscado mitigar la incertidumbre. La tecnología y sus innovaciones han avanzado mucho, y los dispositivos de laboratorio, médicos, industriales y de entretenimiento también. Algunos modelos de sensores pueden permitirnos prevenir accidentes en la industria de la extracción de diferentes hidrocarburos (HC's) como el gas natural. Los sensores son dispositivos que captan magnitudes físicas (variaciones de luz, temperatura, sonido, etcétera) u otras alteraciones de su entorno. Existen sensores o transductores de presión, que transforman la magnitud física de presión o fuerza por unidad de superficie en otra magnitud eléctrica en equipos de automatización o adquisición estándar y que, conectados a un ordenador, vigilan la variación registrada ante determinada actividad (Trapero Villarreal, 2016). Puesto que las tareas de monitoreo ambiental son de gran importancia, contar con sistemas de sensores compactos, portátiles y capaces de identificar contaminantes ambientales facilitaría las tareas relacionadas con el manejo de las emisiones a la atmósfera; y de esta forma, dichas redes de sensores (dispositivos autónomos que trabajan de manera colaborativa) recolectarían información del ambiente o de un entorno específico, datos que se pueden comparar con la concentración promedio de determinados elementos o compuestos para cierta región, o referenciar dichos datos con los límites máximos permisibles presentes en la normatividad ambiental (Rubio et al., 2016).

¹ Integrantes del cuerpo académico en “Ingeniería Aplicada” de la Universidad Tecnológica de Matamoros (UTM).

*Investigador de contacto: johnatan.salazar@utmatamoros.edu.mx

Los sensores para la medición de los contaminantes en el aire, agua y suelo, que pueden usarse durante las actividades de extracción de -HC's- (petróleo y gas natural, por ejemplo), monitorean el impacto ambiental al producirse variaciones de los elementos y compuestos que se encuentran en los ecosistemas, determinando si producen derrames o fugas que se salgan de control (accidentes). Para un constante monitoreo de las concentraciones de dichos elementos o compuestos, se necesitan instrumentos con sensores que obtengan evidencia de las variaciones de los procesos contaminantes, considerando aspectos estructurales del ecosistema y analizando las propiedades fisicoquímicas de las matrices ambientales (suelo, agua, aire) así como de los niveles basales de HC's en: suelo (*background*), vegetación circundante y aire; esto debe poder medirse y documentarse a través de sensores remotos (Beider et al., 2020).

A lo largo de este capítulo se nombrarán algunos sensores y dispositivos capaces de detectar si el entorno ambiental se encuentra en riesgo; detectando la temperatura ambiental, y fugas de sustancias peligrosas: gas, elemento o compuesto tóxico, radiación expulsada por una central nuclear, entre otros.

Emisión de HC's al ambiente

Los HC's son compuestos orgánicos (alifáticos o aromáticos) que contienen carbono e hidrógeno en su estructura, de los cuales se derivan los demás compuestos. Pueden encontrarse de forma líquida natural (petróleo), líquida por condensación (condensados y líquidos del gas natural), gaseoso (gas natural) y sólido (en forma de hielo como son los hidratos de metano). El gas natural se ha convertido en uno de los principales combustibles utilizados a nivel mundial, debido a su bajo costo, por ser menos contaminante que otros HC's durante su combustión, por su relativa disponibilidad y porque es materia prima para la petroquímica. Se obtiene de yacimientos convencionales y no convencionales, y se estima que será el combustible que mayor penetración registrará como aporte de energía primaria (Hernández y Romo, 2018).

Desde el 2013, mediante la reforma energética, el mercado energético de los HC's nacionales tuvo una apertura a la iniciativa privada. Durante las actividades de extracción de gas natural, la emisión de contaminantes puede sobrepasar los límites máximos permisibles establecidos en la normatividad ambiental de México y, por tanto, deben monitorearse (Morales y Roux, 2015). Las empresas dedicadas a estas actividades comúnmente cuentan con protocolos de supervisión para mantenerse dentro de los niveles óptimos; sin embargo, nunca está exento de accidentes, errores o fallas de supervisión o manejo que comprometan la calidad ambiental, poniendo en riesgo a la naturaleza y a las poblaciones humanas que

desarrollan otro tipo de actividades en las mismas zonas de extracción de HC's. Para estas tareas de monitoreo ambiental, resulta vital que las empresas con actividades petroleras cuenten con Sistemas de Monitoreo Ambiental que sean capaces de identificar contaminantes en suelo, agua, sedimento y aire. Dichos dispositivos deben estar al alcance de los pobladores de las zonas aledañas a la zona de extracción (Rubio et al., 2016).

En el municipio de San Fernando, Tamaulipas, ocurren descargas o emisiones en los cuerpos de agua, suelo y aire. También se generan ruidos en las actividades de perforación y extracción de HC's, particularmente en la extracción de gas natural, por el rango de las frecuencias sónicas difícilmente perceptibles en ocasiones se pasan por alto. Esto tiene un impacto negativo en la salud de los ecosistemas, en las poblaciones silvestres y humanas. Por ello, la comunidad científica ha desarrollado diversos dispositivos y sensores para cubrir diversas aplicaciones que midan las diferentes variaciones en la magnitud de los fenómenos físicos y químicos (Rubio et al., 2016) que serían de gran utilidad en este municipio.

El gas natural comercial está compuesto mayoritariamente de metano (CH_4), pero puede contener pequeñas cantidades de etano, propano, butano, nitrógeno y otros HC's más pesados, así como trazas de bióxido de carbono, ácido sulfhídrico y agua. Durante la extracción de HC's se libera metano, dióxido de carbono y otros gases de efecto invernadero altamente tóxicos, que pueden provocar graves daños ambientales. Como medida de seguridad, los distribuidores adicionan un odorante al gas natural para que se pueda percibir su presencia en caso de fugas durante su manejo y distribución. La fuga de gases durante la extracción de HC's también puede tener un impacto negativo en las comunidades cercanas a las operaciones de la empresa petrolera. La exposición prolongada a estos gases puede provocar enfermedades respiratorias, problemas de la piel y otros efectos adversos a largo plazo. Pueden poner en peligro la seguridad de los trabajadores, afectando la eficiencia y la productividad de las operaciones de extracción. Las explosiones e incendios pueden causar daños irreversibles al medioambiente, lo que puede tener un impacto negativo en la vida y la economía de las comunidades cercanas. En las ciudades donde se han desarrollado actividades de explotación de hidrocarburos, se observan tasas de crecimiento mayor en: problemas mentales, crímenes, divorcios, suicidios y alcoholismo, en comparación a aquellas que no se dedican a dicha actividad. Ante este problema, es necesario que la industria petrolera prevenga y mitigue la fuga de gases durante la extracción de HC's (Hernández y Romo, 2018).

Las tecnologías de monitoreo y supervisión ambiental han mejorado significativamente y deben utilizarse para detectar las emisiones y prevenir problemáticas. La degradación ambiental y la aparición de problemas sociales

inherentes al desarrollo de la industria hacen necesario la implementación de estudios que ayuden a identificarlo; de ahí la importancia del uso de la electrónica como instrumento de medición y alerta, lo cual se desarrolla con microcontroladores, sensores y actuadores.

Microcontroladores, sensores y actuadores

Elección del microcontrolador

Los microcontroladores son dispositivos electrónicos con variadas aplicaciones, desde el control de electrodomésticos hasta la creación de robots. *Arduino* y *Raspberry Pi* son dos de los más populares en el mercado. Sin embargo, el *ESP32*, que es relativamente nuevo, ha ganado popularidad por ser mejor que los anteriores (Tabla 1).

Tabla 1. Características de tres diferentes microcontroladores*

Característica	<i>Arduino</i>	<i>Raspberry Pi</i>	<i>ESP32</i>
Facilidad de uso y programación	Fácil de usar y programar	Moderadamente fácil de usar	Fácil de programar y utilizar
Variedad de sensores y módulos	Amplia	Moderada	Gran variedad
Costo	Bajo	Más alto que Arduino	Bajo
Conexión Wi-Fi integrada	No	Sí	Sí
Capacidad de procesamiento y memoria	Menos potente	Poderoso	Poderoso
Sistema operativo	No aplica	Linux y Windows	No aplica
Consumo de energía	Bajo	Mayor consumo	Más eficiente que <i>Arduino</i> y <i>Raspberry Pi</i>
Bluetooth y BLE	No	No	Sí

Fuente: elaboración propia.

El *ESP32* posee conectividad inalámbrica mejorada, ideal para aplicaciones de Internet de las Cosas (IoT). Además, es más rápido y eficiente en consumo de energía en comparación con el *Arduino* y el *Raspberry*. Estos microcontroladores son opciones respetables para proyectos electrónicos. En este trabajo se seleccionó el *ESP32* por tener mejor conectividad, potencia y consumo de energía, es fácil de programar, utilizar y su amplia variedad de módulos y sensores disponibles lo hacen ideal para una variedad de aplicaciones de IoT.

Los sensores son muy importantes en la detección de gas natural durante la

extracción de HC's por varias razones: seguridad, eficiencia, reducción de costos y protección del medioambiente (Tabla 2).

En San Fernando predomina la extracción de gas natural. De este modo, ¿cómo

Tabla 2. Características de diferentes sensores

Sensor	Sensible a:	Concentración	Alimentación	Temperatura	Humedad	Consumo de potencia	Dimensiones (cm)	Tamaño agujeros de montaje (mm)
MQ-135	Metano, propano, GLP, alcohol y humo	-	2.5 - 5 V	-	-	-	4 x 2.1	2
MQ-2	GLP, i-butano, metano, propano, alcohol, hidrógeno, humo	300 - 10000 ppm	5 V	-	-	-	4 x 2	2
MQ-3	Alcohol, etanol	-	2.5 - 5 V	-10 °C hasta 65 °C	≤ 95 % RH	-	-	2
MQ-4	Gas metano, gas carbónico	300 - 10000 ppm	2.5 - 5 V	-10 °C hasta 50 °C	≤ 95 % RH	< 900 mW	-	2
MQ-5	GLP, gas natural	-	2.5 - 5 V	-	-	800 mW	3 x 2 x 2.1	2
MQ-6	Gas LP (propano, butano, gas natural)	200 - 10000 ppm	2.5 - 5 V	20 °C ± 2 °C	≤ 55 ± 5 % RH	< 950 mW	-	2
MQ-7	Monóxido de carbono (CO)	20 - 2000 ppm	5 V	-	-	-	-	2
MQ-8	Gas hidrógeno	100 - 10000 ppm	5 V	-10 °C hasta 50 °C	-	< 900 mW	3.2 x 2.2 x 2.7	2
MQ-9	Monóxido de carbono, gases inflamables	CO: 10 - 1000 ppm Gas: 100 - 10000 ppm	5 V	-10 °C hasta 50 °C	-	-	4 x 2	2

Fuente: elaboración propia con información tomada de createc.3d.com (2014).

podría saberse si la salud de las personas se encuentra en riesgo debido a la extracción de gas? Para esto se requiere que los lugareños, y no solo la empresa dedicada a la extracción, posean un dispositivo que les avise de la presencia de gas en el ambiente donde residen: casa, negocio, almacén, bodega, zona agrícola. Lo anterior, para que puedan responder a una determinada alarma si los niveles en el ambiente superan los límites. Por lo tanto, se plantea crear los protocolos y procedimientos para el desarrollo de determinados dispositivos funcionales, y que estén al alcance de la población.

Selección del sensor

Dadas las características electroquímicas de los sensores detectores de gases, es importante salvaguardar la seguridad del operario o de la población en general. Por ello, se ha seleccionado el sensor MQ-6 como el más adecuado para la detección de fugas o liberaciones de gas (Figura 1).

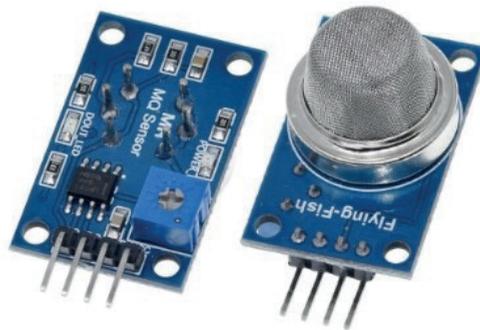


Figura 1. Sensor MQ-6

Fuente: Aelectronics (s.f.).

Ajuste de sensibilidad

El valor de resistencia de MQ-6 es la diferencia para varios tipos y diversos gases de concentración. Entonces, es necesario ajustar la sensibilidad de estos componentes. El calibre del detector debe estar en 1 000 ppm de concentración de GLP en el aire y el valor de uso de la resistencia de carga (R_L) aproximadamente $20k\Omega$ ($10k\Omega$ a $47k\Omega$).

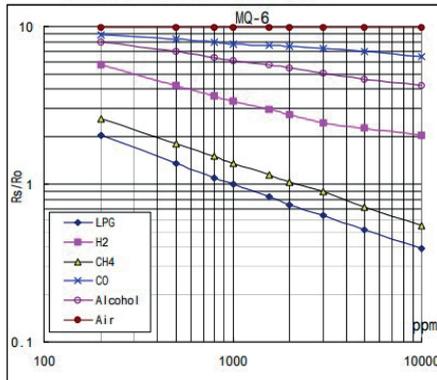


Figura 2. Características de sensibilidad del MQ-6

Fuente: HW sensor (s.f.).

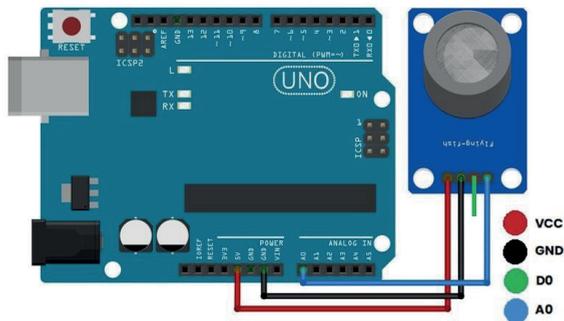


Figura 3. Sensor MQ-6. Conexión salida Analógica, (MQ-6 Detector de Gas LP - UNIT Electronics

Fuente UE Electronics (s.f.).

Cuando se mide con precisión, el punto de alarma adecuado para el detector de gas debe determinarse después de considerar la influencia de temperatura y humedad. El sensor MQ-6, además de ser asequible, es muy fácil de conseguir y vincular con microcontroladores o sistemas como *Arduino*. El esquema eléctrico de dicho sensor es simple, con salidas análogas o digitales para identificar inmediatamente las fugas, por medio de alarmas sonoras o luminosas. El siguiente paso es seleccionar la contraparte del sensor llamada actuador, que es un dispositivo que genera una acción o indicación. Entre los principales actuadores se encuentran: motores, pistones, lámparas, torretas, entre otros.

Selección del actuador

Para la selección del actuador, primero se tendría que plantear las siguientes preguntas: ¿qué acción se pretende realizar? ¿Qué sentidos se intentan estimular en forma de alerta? Lo que se busca es alertar a los habitantes sobre fugas existentes por medio de señales visuales y auditivas. Este tipo de sistemas son de lazo abierto, debido a que no existe una retroalimentación, es decir, el sensor detecta la señal a medir, la manda al controlador, este a su vez decide mediante algoritmos y realiza la acción mediante el actuador (ver Figura 4).

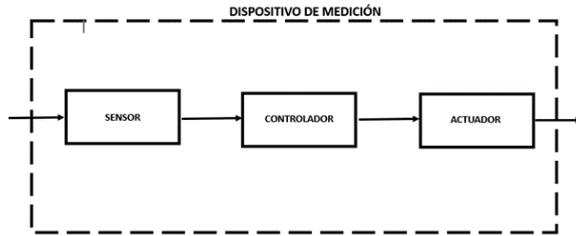


Figura 4. Dispositivo de medición

Fuente: elaboración propia.

Para este tipo de sistemas, la selección de los componentes debe ser muy minuciosa, con la finalidad de que sea confiable para el usuario. Como se mencionó, se pretende estimular la vista y el oído en cada situación de riesgo, por lo que el actuador debe incluir un señalamiento visual y una alerta auditiva. Para este caso, se escogió la torreta baliza luminosa de led - 3 Módulos con sonido (ver Figura 5).



Figura 5. Torreta baliza luminosa de led - 3 módulos con sonido

Fuente: fotografía propia.



Figura 6. Dispositivo de medición integrado

Fuente: imagen propia.

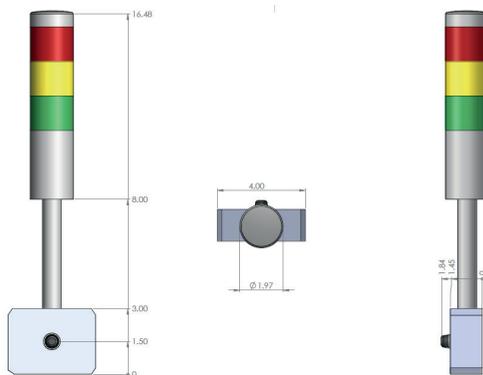


Figura 7. Dimensiones del dispositivo de medición

Fuente: imagen propia.

En la Figura 8 se muestra un pequeño diagrama de conexión en bloques, es importante notar que para la alimentación del controlador se usa una fuente convertidora de 120ac-5vcd.

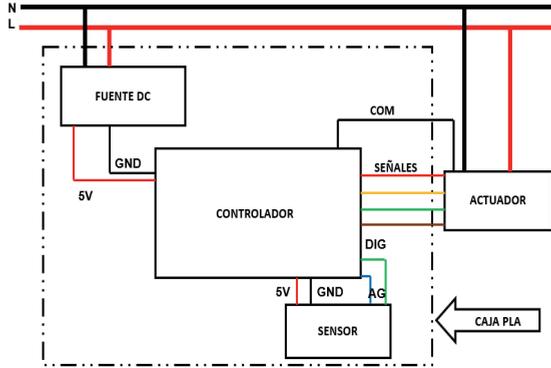


Figura 8. Diagrama de conexión

Fuente: autoría propia.

Sin embargo, se aprovechan los 120 de ac para la alimentación de la torreta, mientras que al controlador solo se le suministran señales de control para la iluminación y el sonido.

Conclusión

Debido a la importancia que tiene México en la extracción de petróleo, gas natural y otros HC's, y reconociéndolo como exportador de petróleo, es necesario entregar información fiable a la sociedad. En este sentido, el poco conocimiento del estado ambiental de los pobladores de las áreas de explotación de Tamaulipas obliga a recalcar que la fuga de gases durante la extracción de HC's, como el gas natural, puede tener un impacto negativo en las comunidades cercanas a las operaciones de la empresa petrolera; siendo la exposición prolongada a estos gases un factor de riesgo que puede provocar enfermedades respiratorias, problemas de la piel y otros efectos adversos en la salud. Por tal motivo, es importante la ingeniería aplicada para el monitoreo y detección del grado de afectación de los ecosistemas, ya que solamente se cuenta con la información que van reportando las empresas.

La ingeniería aplicada debe desarrollar dispositivos, sensores y sistemas de sensores capaces de alertar a la población local por la presencia de fugas de gas en zonas donde los sitios de extracción se encuentren cerca de poblaciones, ya que con esto se pueden prevenir accidentes. El dispositivo mostrado en este capítulo se diseñó específicamente para ser funcional y de bajo costo en estas zonas. Se espera que la cultura de la prevención aumente en la sociedad civil, y con ello se mejore el conocimiento sobre tecnología y seguridad.

Referencias

- Aelectronic. (s.f.). *Sensor MQ-6*. <https://aelectronics.com.mx/sensores/1769-sensor-mq-6.html>
- Beider, A. M., Buono, G. G., Massara Paletto, V., Behr, S. J., Almonacid, D., Gaisch, V. et al. (2020). *Recuperación de áreas afectadas por HC's: monitoreo de intervenciones de bajo impacto*. Instituto de Investigaciones de las Zonas Áridas. Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas Argentina.
- Hernández, C. y Rico, D. (2018). Viabilidad de explotar gas *shale* en algunos municipios del estado de Tamaulipas. *Denarius. Revista de Economía y Administración*, 34(enero-junio), 43-72. <https://doi.org/10.24275>
- HWsensor. (s.f.). *Welcome to Hanwei Cloud Exhibition Hall*. <http://www.hwsensor.com/>
- Morales, D. y Ruth, R. (2015). *Impacto de la industria de HC's en la percepción de los hogares: El caso de San Fernando, Tamaulipas*. Red Internacional de Investigadores en Ciencias de la Gestión.
- Rubio, J. de J., Hernández-Aguilar, J. A., Ávila-Camacho, F. J., Stein-Carrillo, J. M. y Meléndez-Ramírez, A. (2016). Sistema sensor para el monitoreo ambiental basado en redes Neuronales. *Ingeniería Investigación y Tecnología*, XVII(2), 211-222. DOI:10.1016/j.riit.2016.06.006
- Trapero, J. I. (2016). *Informe de prácticas empresariales Aceite, S. A.* Universidad Autónoma de Bucaramanga. Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas.
- UNIT electronics. (s.f.). *Marca UNIT. Explora nuestra línea de productos*. <https://uelectronics.com/>

Algunas obras del mismo coordinador:

- *El Ámbito Fiscal Municipal*
- *El fortalecimiento de la potestad tributaria Municipal a través del ejercicio de la facultad legislativa*
- *Un acercamiento multidisciplinario al aprovechamiento de los hidrocarburos*
- *Petróleo y energías desde las ciencias humanas, sociales y ambientales en América Latina y el Caribe*
- *Estudio jurídico financiero: Poder tributario local México-España*

Consulta estos títulos dentro del catálogo de Libros UAT del Consejo de Publicaciones en el siguiente enlace:



<https://libros.uat.edu.mx>

 <https://publicaciones.uat.edu.mx>

Equipo editorial

Coordinación: Venancio Vanoye Eligio

Gestión y administración: Jessica Abigail Rodríguez Tinajero, María Teresa Maldonado Sada

Revisión y corrección de estilo: José Luis Énder Velarde García, Jorge Alberto Vázquez Herrera

Diseño y maquetación: Erika González Navarro, Wendy Castillo Cruz, Lorena E. Cortez Rodríguez

Agua, suelo agrícola e hidrocarburos: San Fernando un caso de estudio
de Enoc Alejandro García Rivera, coordinador,
publicado por la Universidad Autónoma de Tamaulipas y
Editorial Fontamara en enero de 2025. La revisión y diseño editorial
correspondieron al Consejo de Publicaciones UAT.

El objetivo del documento es esbozar el escenario socioambiental en el que se realizó un conjunto de análisis con el propósito de, en primera instancia, valorar y diagnosticar de forma inicial, y en el marco de procedimientos científicos de índole químico y biológico, las condiciones físicas de los recursos hídricos y superficiales que están expuestos a las actividades de aprovechamiento de hidrocarburos; y en segunda, formular una interpretación inicial de carácter sociojurídico que ofrezca una primera aproximación entre el vínculo que surge por la interacción que se da entre las actividades económicas de índole primario, los elementos abióticos vinculados a ellas y la explotación de los hidrocarburos.

En 2013, el gobierno federal instaló en la democratización de la productividad el impulsó al desarrollo económico y social nacional y regional del país, y al sector energético de los hidrocarburos lo situó como su principal instrumento para concretizarlo. Fue con base en esa política pública como el Estado mexicano consideró impulsar el crecimiento económico y la equidad social de las próximas décadas. A través de la planeación nacional 2013-2018, el gobierno federal implementó la estrategia de democratizar la productividad como una política pública transversal, cuya función primordial sería la de establecerse como el principal catalizador jurídico-administrativo para la consecución de las metas nacionales planteadas, especialmente aquellas vinculadas con el desarrollo económico.

De acuerdo con las cifras que se presentaron en ese periodo, el sector económico productivo de México se ubicaba en una posición media como destino propicio de negocios; mientras que en materia de empleo, su tasa de desempleo entre la población económicamente activa era del 30.6 por ciento. A partir de condiciones socioeconómicas, el gobierno nacional consideró necesario elevar la productividad en el país a través de una democratización de los recursos productivos que permitiera establecer un entorno de negocios adecuado, el cual, además, estuviera soportado en un marco normativo que facilitase, entre otras cosas, la disposición de los bienes públicos que pudiesen operar entre las empresas como un recurso generador de prosperidad.

ISBN UAT: 978-607-8888-66-5

ISBN Editorial Fontamara: 978-607-736-966-0

ISBN: 978-607-736-966-0

