

DICTAMEN DIAGNÓSTICO AMBIENTAL

*De la Actividad Porcícola
en Yucatán*

Marzo 2023



MEDIO AMBIENTE

SECRETARÍA DE MEDIO AMBIENTE Y RECURSOS NATURALES

DICTAMEN DIAGNÓSTICO AMBIENTAL

*De la Actividad Porcícola
en Yucatán*

Marzo 2023



MEDIO AMBIENTE

SECRETARÍA DE MEDIO AMBIENTE Y RECURSOS NATURALES

DICTAMEN DIAGNÓSTICO AMBIENTAL

De la Actividad Porcícola en Yucatán Marzo 2023

Primera edición, 2023

DR © 2023, SECRETARÍA DE MEDIO AMBIENTE Y RECURSOS NATURALES

Av. Ejército Nacional 223

Col. Anáhuac I Sección, C.P. 11320,

Miguel Hidalgo, CDMX, México.

Teléfono 55 56 28 06 00

<http://www.gob.mx/semarnat>

CONTENIDO

	Página
INTRODUCCIÓN GENERAL	9
FUNDAMENTO LEGAL	10
LA PORCICULTURA EN EL MUNDO, EN MÉXICO Y YUCATÁN	14
CARACTERIZACIÓN DE LA ACTIVIDAD PORCÍCOLA EN YUCATÁN	18
DIAGNÓSTICO DE CALIDAD DEL AGUA	31
5.1 Calidad del agua en cenotes y pozos de abastecimiento	34
5.2 Aguas Residuales de Granjas Porcícolas	50
DIAGNÓSTICO DE AIRE	58
DIAGNÓSTICO DE SUELO	74
CONCLUSIONES	81
RECOMENDACIONES GENERALES	82
LÍMITES DE SUSTENTABILIDAD A LA INDUSTRIA PORCINA	84
ANEXOS	90
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	95

FIGURAS

	Página
1 Geolocalización de 507 coordenadas correspondientes a posibles granjas porcícolas en Yucatán con su nomenclatura de identificación	19
2 Geolocalización de 507 coordenadas correspondientes a posibles granjas porcícolas en Yucatán y Anillo de Cenotes	20
3 Capacidad instalada por número de naves en las 507 coordenadas de posibles granjas	21
4 Caracterización de una granja tipificada como “complejo” mediante las herramientas de visualización geoespacial.	21
5 Mapa de ubicación de complejos con más de 8 naves.	22
6 Buffer de concentración de naves de granjas porcícolas.	23
7 Número de coordenadas de posibles granjas identificadas por municipio	24
8 Conformación de la Reserva Estatal Geohidrológica Anillo de Cenotes	26
9 Mapa de concentración de granjas en la Reserva Geohidrológica Anillo de Cenotes	26
10 Mapa de concentración de granjas en la Zona de Recarga de la Reserva Geohidrológica Anillo de Cenote	27
11 Mapa de concentración de granjas en la Zona de Tránsito de la Reserva Geohidrológica Anillo de Cenotes	28

12	Mapa de concentración de granjas en la Zona de Descarga de la Reserva Geohidrológica Anillo de Cenotes.	28
13	Ubicación de coordenadas de posibles granjas en Áreas Naturales Protegidas.	29
14	Ubicación de los títulos de concesión de CONAGUA y las 507 coordenadas de posibles granjas porcícolas.	30
15	Cenote X'tojil en el estado de Yucatán	34
16	Modelo conceptual simplificado de funcionamiento del acuífero de la península de Yucatán.	35
17	Pozos de agua potable, cenotes y granjas porcícolas.	36
18	Pozos de agua potable muestreados	37
19	Ubicación de los Cenotes muestreados.	37
20	Identificación y control de las muestras	39
21	Isograma de pH.	41
22	Isograma de conductividad eléctrica ($\mu\text{S}/\text{cm}$).	42
23	Isograma de concentración de oxígeno disuelto (mg/L).	43
24	Concentración de Nitratos (mg/L).	44
25	Evaluación del coeficiente cualitativo K (Conesa, 1993).	45
26	Análisis espacial por zona.	46
27	Concentración de Nitrógeno Amoniacal en Cenotes.	47
28	Análisis espacial estratificado del Nitrógeno Amoniacal (NH_3). Zona Sur de la Ciudad de Mérida	48
29	Análisis espacial estratificado del Nitrógeno Amoniacal (NH_3). Zona Este de la Ciudad de Mérida.	48
30	Concentración de Nitratos en Cenotes.	49
31	Concentración de fósforo total en Cenotes.	50
32	Concentración de E. Coli en cenotes	50
33	Ubicación de las granjas porcícolas muestreadas y concentraciones en los efluentes.	56
34	Ubicaciones de las tres granjas porcícolas donde se realizaron las mediciones	59
35	Proceso de instalación y operación de unidad móvil para determinación de concentraciones ambientales, en granjas ubicadas en el estado de Mérida	61
36	Determinación de metales en las muestras de suelo por ICP-OES.	62
37	Determinación de metales en las muestras de suelo por ICP-MS.	63
38	Determinación de aniones y cationes en las muestras de suelo por HPIC.	63
39	Concentración de amoníaco (NH_3)- Promedio de 24 horas.	64
40	Concentraciones promedio de 24 horas, de metano.	64
41	Concentraciones promedio, de 24 horas, de ácido sulfhídrico (H_2S) en los cuatro sitios considerados en la campaña de mediciones	65
42	Concentraciones promedio de 24 horas, dióxido de azufre.	65

43	Rosas de Vientos de los sitios de muestreo	66
44	Rosa de amoníaco y ácido sulfhídrico en granjas monitoreadas.	67
45	Rosa de metano y dióxido de azufre en sitios de muestreo	68
46	Imagen de los diferentes sistemas meteorológicos del 18 de octubre del 2022	69
47	Campos de viento modelados para las 1, 7, 13 y 19 horas.	70
48	Liberación de un PUFF de emisión y su área de influencia en la granja 3 el 18 de octubre del 2022	71
49	Liberación de un PUFF de emisión y su área de influencia en la granja 2, el 19 de octubre del 2022	71
50	Liberación de un PUFF de emisión y su área de influencia en la granja 1, el 20 de octubre del 2022	72
51	Imagen de las columnas satelitales de metano XCH ₄ (methane mixing ratio) en el Estado de Yucatán promedio del periodo de 01/01/2022 al 01/11/2022. Elaboración INECC. Datos Sentinel-5P, Tropomi	73
52	Sistema de riego para la dispersión de material orgánico proveniente de porquerizas	77
53	Nivel de contaminación del agua considerando para el nitrógeno una C _{max} =3.0 mg/l inducido por la industria porcina en el estado de Yucatán (pines azules representan la ubicación de granjas porcinas en el estado).	85
54	Nivel de contaminación del agua considerando para el nitrógeno una C _{max} =10.0 mg/l inducido por la industria porcina en el estado de Yucatán (pines azules representan la ubicación de granjas porcinas en el estado)	86

TABLAS

		Página
1	Evolución del inventario en los principales estados porcícolas, 2011 - 2020	16
2	Comunidades con la mayor concentración de coordenadas de posibles granjas porcinas en un radio de 5km.	25
3	Distribución de coordenadas de posibles granjas y naves identificadas mediante geovisualización en la Reserva Estatal Geohidrológica Anillo de Cenotes.	31
4	Tipo de contenedor y preservación por parámetro para su análisis.	38
5	Características del equipo multiparamétrico	39
6	Resumen de parámetros de campo en pozos de agua.	40
7	Granjas en las que se muestrearon los sistemas de tratamiento de aguas	51
8	Directrices para preservación y transporte de las muestras.	53
9	Eficiencia de remoción de los sistemas de tratamiento de aguas residuales en las granjas porcinas.	55
10	Características de los efluentes de los sistemas de tratamiento de las granjas porcícolas	55

11	DQO total, soluble y diferencial (DQO suspendida)	56
12	Coordenadas de las granjas donde se realizó el monitoreo atmosférico y la caracterización de suelos.	59
13	Identificación de muestras de suelo	60
14	Equipos automáticos del laboratorio móvil del INECC empleados durante las mediciones.	60
15	Granja 1, y el uso de suelo INEGI 2018	74
16	Granja 2, y el uso de suelo INEGI 2018	74
17	Granja 3, y el uso de suelo INEGI 2018	74
18	Cambio de uso de suelo y vegetación de las poligonales alrededor de la granja 1, comparando el conjunto de datos vectoriales de la Carta de Uso del Suelo y Vegetación, Escala 1:250,000, Serie III (Continuo Nacional) 2005, versus el conjunto de datos vectoriales de Uso del Suelo y Vegetación, Escala 1:250,000 – Serie VII. 2018	75
19	Cambio de uso de suelo y vegetación de las poligonales alrededor de la granja 2, comparando el conjunto de datos vectoriales de la Carta de Uso del Suelo y Vegetación, Escala 1:250,000, Serie III (Continuo Nacional) 2005, versus el conjunto de datos vectoriales de Uso del Suelo y Vegetación, Escala 1:250,000 – Serie VII. 2018.	76
20	Cambio de uso de suelo y vegetación de las poligonales alrededor de la granja 3, comparando el conjunto de datos vectoriales de la Carta de Uso del Suelo y Vegetación, Escala 1:250,000, Serie III (Continuo Nacional) 2005, versus el conjunto de datos vectoriales de Uso del Suelo y Vegetación, Escala 1:250,000 – Serie VII. 2018.	76
21	Valores de metales y metaloides presentes en suelos de granjas porcinas	78
22	Valores de aniones y cationes presentes en suelos de granjas porcinas	79
23	Valores de aniones presentes en lodos de granjas porcinas	79
24	Valores de cationes presentes en lodos de granjas porcinas.	79



1. INTRODUCCIÓN GENERAL

El derecho de todas las personas a un medio ambiente sano para su desarrollo y bienestar, está consagrado en el Artículo 4º de la Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos, donde se establece que el Estado tiene la obligación de garantizar el respeto a este derecho, y para tal efecto, existe una estructura normativa e institucional.

En el ámbito de las facultades que le otorga la Ley Orgánica de Administración Pública Federal a la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT), le corresponde a esta Secretaría el ejercicio de las facultades de la Federación en lo concerniente a la formulación y conducción de la política ambiental nacional, la aplicación de instrumentos que respecto a ella establece la ley, regular acciones para la preservación y restauración del equilibrio ecológico y la protección al ambiente; así como atender asuntos que afecten el equilibrio ecológico en el territorio nacional.

En este contexto, por instrucciones de la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, María Luisa Albores González, se desarrolló un arduo trabajo de campo y de gabinete a efecto de realizar un Dictamen Diagnóstico Ambiental de la Actividad Porcícola en el estado de Yucatán. Su elaboración fue encomendada a la Dirección General de Recursos Naturales y Bioseguridad que coordinó la participación del Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC), el Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA) y diversas áreas de la SEMARNAT.

Este Dictamen Diagnóstico Ambiental tiene por objetivo analizar la dinámica de la actividad porcícola en el estado de Yucatán y conocer sus implicaciones ambientales en el territorio, dadas las características ecosistémicas propias del suelo kárstico de Yucatán.

El presente documento está conformado por doce apartados: Introducción General, Fundamento Legal, La porcicultura en México, el mundo y Yucatán, Caracterización de la actividad porcícola en el estado de Yucatán, Diagnóstico de Calidad del Agua, Diagnóstico de Suelo, Diagnóstico de Calidad del Aire, Conclusiones, Recomendaciones, Límites de Sustentabilidad a la Industria Porcina, Anexos y Bibliografía.

En el apartado denominado Fundamento Legal, se establecen las bases normativas que dan sustento a la SEMARNAT para llevar a cabo este ejercicio diagnóstico, así como un esbozo de las disposiciones jurídicas y normativas que regulan la actividad pecuaria a nivel nacional y en el estado de Yucatán.

Posteriormente, el apartado *La porcicultura en México, el mundo y Yucatán* hace una breve recapitulación del dinamismo global de la actividad, el rol que desempeña el país y su introducción al estado de Yucatán.

El siguiente apartado titulado *Caracterización de la actividad porcícola en el estado de Yucatán*, hace un breve recuento de los resultados del trabajo de investigación realizado por la SEMARNAT para conocer el estado actual de la actividad porcícola en el estado.

En seguida, los apartados, denominados *Diagnósticos de calidad del agua, aire y suelo*, respectivamente, presentan los resultados de los monitoreos llevados a cabo por el IMTA y el INECC durante el último trimestre del 2022 en Yucatán, para diagnosticar las implicaciones ambientales de la actividad porcícola en el estado.

Posteriormente, se incorpora un apartado de *Conclusiones y uno de Recomendaciones*, los cuales consideran los resultados de los monitoreos y del arduo de investigación realizado por el sector ambiental.

Finalmente, se cuenta con un apartado denominado Límites de Sustentabilidad a la Industria Porcina, como una serie de recomendaciones que, desde la visión del desarrollo sustentable, establecen las líneas a seguir para asegurar un equilibrio entre la esfera económica, social y ambiental que deben ser consideradas en el desarrollo de la actividad porcícola en el estado.

Por último, se cuenta con un apartado de Anexos y uno de Referencias bibliográficas, donde es posible consultar información adicional de soporte, así como el listado de las referencias bibliográficas citadas a lo largo del documento.





2. FUNDAMENTO LEGAL

La Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos reconoce, en su artículo 4º, párrafo quinto, el derecho humano a un ambiente sano para el desarrollo y bienestar de todas las personas.

Ese derecho debe ser respetado, promovido, protegido y garantizado por las autoridades ambientales y por aquellas que ejerzan funciones relativas a otros derechos que le estén vinculados y que, por tanto sean interdependientes con él.

Vinculado al derecho humano a un ambiente sano, se encuentran los relativos a la salud, al acceso al agua para consumo, para uso personal y doméstico, de forma suficiente, aceptable, salubre y asequible. Así como a los que prevé el artículo 27 del propio ordenamiento, que establece que el Estado mexicano debe regular en beneficio social el aprovechamiento de los elementos naturales susceptibles de apropiación para distribuir equitativamente la riqueza pública, cuidar de su conservación, lograr el desarrollo equilibrado del país y el mejoramiento de las condiciones de vida de la población rural y urbana.

Para ello, el mismo precepto dispone, que deberán dictarse medidas que establezcan adecuadas provisiones, usos, reservas y destinos de tierras, aguas y bosques para evitar la destrucción de los elementos naturales.

En el artículo 25 constitucional, confiere al Estado Mexicano la rectoría del desarrollo nacional para que sea integral y sustentable, fortalezca la soberanía nacional, su régimen democrático y para que mediante, una más justa distribución del ingreso y la riqueza, permita el pleno ejercicio de la libertad y la dignidad de los individuos, grupos y clase sociales cuya seguridad protege.

Los principios referentes a apoyar e impulsar a los sectores social y privado de la economía, a fin de que, con responsabilidad social, bajo criterios de equidad, productividad, sustentabilidad y sujetándose a las modalidades que dicte el interés público y el uso en beneficio general de los recursos productivos, cuidando en todo momento su conservación y el medio ambiente, son base fundamental del desarrollo nacional.

Es así como, en México las personas físicas y jurídicas pueden utilizar, aprovechar y explotar los recursos productivos para el desarrollo de sus actividades y ser impulsadas para lograr su crecimiento. Esto, siempre bajo criterios de equidad social, productividad, sustentabilidad y cuidando la conservación de los propios recursos y del medio ambiente.

En este sentido destaca lo establecido en el artículo 27 constitucional, que reconoce que la propiedad de las tierras y aguas comprendidas dentro de los límites del territorio nacional, corresponde originariamente a la Nación, la cual ha tenido y tiene el derecho de transmitir el dominio de ellas a los particulares, constituyendo la propiedad privada.

La nación tendrá en todo momento el derecho de imponer a la propiedad privada las modalidades que dicte el interés público, así como el de regular, en beneficio social, el aprovechamiento de los elementos naturales susceptibles de apropiación, con objeto de hacer una distribución equitativa de la riqueza pública, cuidar de su conservación, lograr el desarrollo equilibrado del país y el mejoramiento de las condiciones de vida de la población rural y urbana.

Más adelante señala también de manera explícita que estos preceptos aplicarán para el fomento de la agricultura, de la ganadería, de la silvicultura y de las demás actividades económicas en el medio rural, con el fin de evitar la destrucción de los elementos naturales y los daños que la propiedad pueda sufrir en perjuicio de la sociedad.

Los principios anteriores, que rigen entre otras a la materia ambiental, se desarrollan fundamentalmente en la Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente, que en su artículo 1º establece que es reglamentaria de las disposiciones constitucionales ya señaladas en tanto que regula la preservación y restauración del equilibrio ecológico, cuestiones que atañen indudablemente a la protección del ambiente.

La citada Ley, en sus artículos 5, 11 y 12, señala que corresponde a la SEMARNAT ejercer las facultades de la Federación en lo concerniente a la formulación y conducción de la política ambiental nacional, la aplicación de instrumentos que respecto a ella establece la ley, regular acciones para la preservación y restauración del equilibrio ecológico y la protección al ambiente; así como, atender aquellos asuntos que afecten el equilibrio ecológico en el territorio nacional.

La política ambiental mexicana establecida en el artículo 15 de la Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente, considera que los ecosistemas son patrimonio común de la sociedad y que de su equilibrio depende la vida en las posibilidades productivas del país. En este sentido, los ecosistemas, conjuntamente con sus elementos, deben aprovecharse de forma tal que se asegure





una productividad óptima y sustentable, compatible con su equilibrio e integridad.

Corresponde según las fracciones III y IV del referido artículo 15, tanto a las autoridades como a los particulares, asumir la responsabilidad de proteger el equilibrio ecológico, debiendo éstos, en aquellos casos en los que causen daños, repararlos y asumir sus costos, lo que debiera ser excepcional; pues por encima de esto se encuentra la obligación de prevenir o minimizar las afectaciones ambientales, por quienes realicen actividades que puedan causarlas.

En el acatamiento de esas obligaciones debe considerarse que las afectaciones o daños ambientales no sólo comprenden las condiciones presentes, sino también aquellas que determinarán la calidad de vida de las futuras generaciones de conformidad con la fracción V del mismo artículo.

Para lograr la eficacia de las acciones ecológicas, es indispensable la coordinación entre dependencias y entidades de la administración pública y entre los distintos órdenes de gobierno y una responsable y activa participación de la sociedad y de sus organizaciones.

Las autoridades ambientales, deben garantizar en todo momento el derecho de las comunidades, incluidos los pueblos indígenas, a la protección, preservación, uso y aprovechamiento sustentable de los recursos naturales y la salvaguarda y uso de la biodiversidad de acuerdo con lo que se establezca en las leyes, tal y como lo establece la fracción XIII, del artículo 15 de la Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente.

Garantizar el derecho humano a un medio ambiente sano, implica la obligación de la autoridad de controlar y prevenir la contaminación ambiental, orientar y lograr un adecuado aprovechamiento de los elementos naturales y el mejoramiento del entorno natural en los asentamientos humanos.

Además de ser la competente para fijar la política ambiental, la SEMARNAT, tiene el carácter de autoridad en la materia. Es por ello que, paralelamente a la obligación de ser la autoridad garante de la preservación de la naturaleza, sus recursos y del goce del derecho a un ambiente sano, le corresponde ejercer, ya sea de manera directa o a través de sus unidades administrativas y las Instituciones que le están sectorizadas, las funciones que le competen, para cumplir con los principios de política ambiental y a la par, llevar a cabo las actividades conducentes que permitan conocer el estado de los ecosistemas, de la biodiversidad y de los diversos elementos que integran la naturaleza, como lo son el suelo, el agua, la atmósfera, entre otros.

Para ello, esta Secretaría debe realizar actividades permanentes, que le permitan conocer y diagnosticar la situación ambiental de una o más zonas, regiones, estados o sitios del país. En el caso concreto de este Diagnóstico Ambiental de la Actividad Porcícola, el ámbito de estudio se delimita al estado de Yucatán.

Sin ánimo de ser exhaustivo, con relación a la legislación ambiental en México mediante la cual se regula la operación de granjas porcinas, a continuación se presenta un listado de las leyes vinculadas en la materia:

- Ley General de Equilibrio Ecológico y Protección al Ambiente (LGEEPA)
- Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos (LGPGIR)
- Ley de Aguas Nacionales (LAN)
- Ley Federal de Derechos. Disposiciones Aplicables en Materia de Aguas Nacionales.
- Ley General de Salud (LGS)
- Ley Federal de Sanidad Animal (LFSA)
- Ley de Organizaciones Ganaderas (LOG)
- Ley de Desarrollo Rural Sustentable (LDRS)

Asimismo, en la jerarquía jurídica de los ordenamientos aplicables a esta actividad económica, se encuentran los reglamentos de dichas leyes, entre los que destaca el Reglamento de la LGEEPA en Materia de Evaluación del Impacto Ambiental (REIA).

Además, se pueden distinguir tres grupos de normas oficiales mexicanas relacionados con la producción porcina:

a) En relación con el manejo de los cerdos:

- NOM-033-SAG/ZOO-2014, Métodos para dar Muerte a los animales domésticos y silvestres.
- NOM-067-ZOO-2007, Campaña Nacional para la prevención y control de la rabia en bovinos y especies ganaderas.
- NOM-194-SSA1-2004, Productos y Servicios. Especificaciones sanitarias en los establecimientos dedicados al sacrificio y faenado de animales para abasto, almacenamiento, transporte y expendio. Especificaciones sanitarias de productos.
- NOM-058-ZOO-1999, Especificaciones para las instalaciones y operación de los puntos de verificación e inspección zoonosanitaria.





- NOM-051-ZOO-1995, Trato humanitario en la movilización de animales.

b) En relación con el medio ambiente:

- NOM-001-SEMARNAT-2021, Que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en aguas y bienes nacionales.
- NOM-002-SEMARNAT-1996, Que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales a los sistemas de alcantarillado urbano municipal.
- NOM-003-SEMARNAT-1997, Que establece los límites máximos permisibles de contaminantes para las aguas residuales tratadas que se reusen en servicios al público, la norma incluye los límites máximos permisibles de contaminantes, en esta norma a diferencia de las anteriores, el agua residual tratada no debe contener metales pesados.
- NOM-004-SEMARNAT-2002, Protección ambiental.- Lodos y biosólidos.-Especificaciones y límites máximos permisibles de contaminantes para su aprovechamiento y disposición final.
- NOM-059-SEMARNAT-2010, Protección ambiental-Especies nativas de México de flora y fauna silvestres-Categorías de riesgo y especificaciones para su inclusión, exclusión o cambio-Lista de especies en riesgo.
- NOM-230-SSA1-2002, Salud ambiental. Agua para uso y consumo humano, requisitos sanitarios que se deben cumplir en los sistemas de abastecimiento públicos y privados durante el manejo del agua, así como, los procedimientos sanitarios para el muestreo y el proceso de colecta de muestra.

c) En relación con los residuos:

- NOM-087-ECOL-SSA1-2002, Protección ambiental – Salud ambiental – Residuos peligrosos biológico-infecciosos – Clasificación y especificaciones de manejo.
- NOM-052-SEMARNAT-2005, Que establece las características, el procedimiento de identificación, clasificación y los listados de los residuos peligrosos
- NOM-161-SEMARNAT-2011. Que establece los criterios para clasificar a los Residuos de Manejo Especial y determinar cuáles están sujetos a Plan de Manejo

Por otro lado, cabe señalar que dentro de las disposiciones estatales en materia ambiental que regulan la actividad porcícola se encuentran las siguientes:

- Ley de Protección al Medio Ambiente del Estado de Yucatán.

De acuerdo el artículo 2, fracción III, establece que se considera de utilidad pública la prevención, regulación y control de las actividades industriales, agropecuarias, comerciales, de servicios y demás que contaminen el ambiente; así como el cuidado, restauración y aprovechamiento de los recursos naturales y de ecosistemas necesarios para asegurar dichos recursos. (Ley de Protección al Medio Ambiente del Estado de Yucatán, 2021)

Asimismo, en el artículo 32, fracción V, se estipula que requerirán de la Autorización de Impacto Ambiental, las personas físicas o morales que pretendan el establecimiento y construcción de plantas industriales que no sean competencia de la Federación, así como las agroindustrias y los centros de producción pecuaria.

Por su parte, en el artículo 95, se establece que las emisiones contaminantes a la atmósfera tales como: humo, polvos, gases, vapores, olores, ruido, vibraciones y energía lumínica, no deberán rebasar los límites máximos permisibles contenidos en las normas oficiales vigentes, en las normas técnicas ambientales que se expidan y en las demás disposiciones locales aplicables en el estado de Yucatán. Los propietarios de fuentes fijas y móviles que generen cualquiera de estos contaminantes, están obligados a instalar mecanismos para la recuperación y disminución de las emisiones contaminantes.

Asimismo, en el Artículo 111 se establece que la generación de aguas residuales en cualquier actividad susceptible de producir contaminación, conlleva la responsabilidad de su tratamiento previo a su uso, reúso o descarga, de manera que la calidad del agua cumpla con la normatividad aplicable.

Respecto a la prevención y control de la contaminación del suelo, establecida en el artículo 113, se deberá prevenir y reducir la generación de residuos sólidos urbanos y de manejo especial, e incorporar tecnologías, técnicas y procedimientos para su reúso y reciclaje, así como regular su manejo y disposición final eficientes;

- Reglamento de la Ley de Protección al Medio Ambiente del Estado de Yucatán.





Establece en su Artículo 9 que las autoridades o los particulares que realicen obras o actividades que pueden causar desequilibrio ecológico, deberán consultar y vincularse con los Programas de Ordenamiento Ecológico vigentes en el Territorio del Estado antes de realizar cualquier acción, para determinar si la vocación del suelo es compatible con la obra o actividad propuesta; para ello deberán solicitar a la Secretaría que emita su opinión sobre la compatibilidad del proyecto, mediante un dictamen de factibilidad urbana ambiental, previa presentación de la información que se indica en el artículo 29 de este Reglamento. (Reglamento de la Ley de Protección al Medio Ambiente del Estado de Yucatán, 2021)

Asimismo, establece en el artículo 28 que, para todas las obras y actividades mencionadas en el artículo 32 de la Ley que reglamenta, se presentará una solicitud a la Secretaría de Desarrollo Sustentable para obtener la factibilidad urbana ambiental. Dicha factibilidad se deberá obtener de manera previa a cualquier permiso o licencia de uso de suelo emitida por la autoridad municipal. Una vez analizada dicha solicitud, se determinará si es factible la realización del proyecto en el sitio de acuerdo a la vocación del suelo, conforme a lo establecido en los Programas de Ordenamiento Ecológico Territorial en el Estado, los Programas de desarrollo urbano de los municipios y normatividad aplicable.

Por su parte, el artículo 134 refiere que las emisiones de cualquier tipo de contaminante de la atmósfera no deberán exceder los niveles máximos permisibles, por tipo de contaminante o por fuente de contaminación que establezcan en las Normas Oficiales Mexicanas. Y, conforme al artículo 135, son fuentes fijas de competencia estatal, las que se coloquen en las empresas industriales que no sean de competencia de la Federación.

Respecto a las áreas verdes, se establece en el artículo 210 que serán establecidas por la Secretaría de Desarrollo Sustentable y se fijarán de acuerdo a la proporción de la zona afectada o por afectar, por el desarrollo de obras o actividades, y deberá ser de, al menos, el 15 por ciento de la extensión total de la zona, o en su caso, se observará lo establecido en los ordenamientos específicos que establezcan porcentajes para dichas superficies.

Asimismo, conforme al artículo 211, el establecimiento de las áreas verdes es independiente y adicional a otras superficies establecidas en los diversos ordenamientos de desarrollo urbano y el riego de áreas verdes, se utilizarán únicamente agua pluvial capturada o aguas grises o negras tratadas para su reciclaje que cumplan con la NOM-003- SEMARNAT-1997.

- Decreto de la Reserva Estatal Geohidrológica Anillo de Cenotes.

En el ámbito de la conservación ambiental del acuífero de la península de Yucatán, destaca la conformación de la Reserva Estatal Geohidrológica Anillo de Cenotes.

En octubre de 2013 surgió el Decreto número 117 en el Diario Oficial del Gobierno del Estado de Yucatán, que establece el “Área Natural Protegida denominada Reserva Estatal Geohidrológica del Anillo de Cenotes”.

El Anillo de cenotes posee, en su totalidad, una gran importancia biológica, social, cultural y económica. Dentro del círculo o anillo de cenotes, constituido por 53 municipios, se clasifican cuatro subzonas en función del micro-relieve presente y características propias como área de recarga, tránsito y descarga.

El artículo 8 del Decreto que establece el área natural protegida denominada Reserva Estatal Geohidrológica del Anillo de Cenotes, indica que Dentro de la Reserva podrán realizarse actividades de desarrollo sustentable, siempre que sean compatibles con lo establecido en este Decreto y se prohíbe realizar actividades que por su naturaleza impacten significativamente u ocasionen en el corto, mediano o largo plazo, impactos adversos al medio ambiente o a los ecosistemas. (Diario Oficial del Gobierno del Estado de Yucatán, 2013)

Cabe señalar que, si bien el área que conforma el Anillo de Cenotes está conformado por 53 municipios, el carácter de protección de Reserva Estatal sólo se limita a la zona de recarga, conformada por los municipios Seyé, Acanceh, Timucuy, Homún, Cuzamá, Tecoh, Tekit, Tahmek, Hochtún, Xocchel, Hocabá, Sanahcat y Huhí- Esta zona es “el punto de la geografía yucateca con la segunda mayor densidad de cenotes por kilómetro cuadrado” (Llanes, 2022).

Entre los objetivos de delimitar la Reserva, se encuentran: II. Restaurar y conservar los ecosistemas de selva baja y cenotes en el área de recarga y aquellos sitios asociados a conductos preferenciales de agua subterránea del anillo interior, IV. Desarrollar estudios e investigaciones tendientes al manejo sustentable de la Reserva con la participación de centros de investigación, universidades y tecnológicos para prevenir la contaminación y desarrollar tecnología que eficiente el tratamiento de las aguas residuales y remediación de áreas contaminadas, y V. Garantizar la permanencia de los servicios ecosistémicos básicos de la Reserva, como es la provisión del agua.





Por otra parte, el artículo 6 del Decreto dispone que se elaborará un Programa de manejo, el cual establecerá las acciones concretas para la administración, conservación, promoción, mantenimiento, evaluación, comunicación, y aprovechamiento de los servicios ambientales de los ecosistemas contenidas en ella. No obstante, hasta el momento no ha sido publicado.

En junio de 2014 el exgobernador Zapata Bello publicó el Decreto 193/2014 por el que se expide

el Reglamento de la Ley de Protección al Medio Ambiente del Estado de Yucatán en Materia de Cenotes, Cuevas y Grutas, que aunque contiene avances en la materia, no supe la necesidad de un Programa de Manejo para la REGAC

3. LA PORCICULTURA EN EL MUNDO, EN MÉXICO Y EN YUCATÁN

Panorama Internacional

La porcicultura es una de las actividades pecuarias más dinámicas del país. Involucra diferentes estratos de producción, desde los pequeños productores artesanales o familiares, hasta grandes empresas integradas verticalmente, abocadas principalmente al comercio internacional.

El desarrollo de la industria porcícola es constante a nivel global, ya que la carne de cerdo juega un papel importante como fuente de proteína para el ser humano. No obstante, hay una alta concentración de la industria en el mundo, el 75% de la producción se obtiene en China, la Unión Europea y Estados Unidos.

En tanto que, México se ubica como un productor mediano, que representa 1.1% de la producción mundial, pero destaca como importador, pues sus compras representan 9% del total del comercio internacional del producto. A pesar de los números positivos de exportación, nuestro país permanece como importador neto.

Cabe señalar que, la porcicultura tiende a ser realizada en países con abundancia de recursos y territorio, ya que la actividad genera externalidades negativas poco visibles y que en general no se asumen como parte del análisis de rentabilidad, dado que no se incluyen la reparación al medio ambiente o a las personas, ni el costo ambiental de los daños generados.

En lo que respecta a los modelos de organización de la industria, existen diferentes tipos, desde países en donde prácticamente la totalidad de la producción proviene de productores integrados verticalmente, como Dinamarca. Y otros casos donde existe colaboración entre competidores, como sucede en Alemania; y otros más, donde la industria se desarrolla a partir de relaciones contractuales como en Estados Unidos (OCDE, 2019).

El dinamismo de la industria porcina, ha sido determinado no sólo por el comportamiento económico de los mercados, sino también por factores de sanidad. Tal y como lo ha sido la Peste Porcina Africana (PPA), cuyos efectos se observaron durante gran parte de 2019 y años subsecuentes.

La PPA se transmite por un virus complejo para lo cual no hay una vacuna efectiva disponible. Afecta a la especie porcina, en estado doméstico y/o salvaje. Se presenta en cerdos vivos o muertos, y puede permanecer en carne, despojos, canales y sangre; incluso por tiempos prolongados en carne congelada y productos procesados.

Debido a la PPA, China uno de los principales países que dominaba el mercado internacional de carne de cerdo, sufrió pérdidas considerables. Las fuentes más optimistas hablan de una pérdida cercana al 25% del hato productivo, mientras que otras estimaciones llegan a una disminución de hasta 50%. Este suceso repercutió en países de Europa, donde





se realizaron esfuerzos para combatir el avance de la enfermedad (PIC-LATAM, 2020).

No obstante, mientras la PPA azotó a China y parte del continente asiático, en México se abrió una ventana de oportunidad, logrando exportar a Japón y China, considerados como mercados altamente exigentes.

Panorama Nacional

Si bien, a partir de 2019, México alcanzó un papel más significativo en el escenario del comercio internacional de carne de cerdo, la madurez de este sector productivo remonta sus inicios al contexto de la firma del Tratado de Libre Comercio de América del Norte en 1994. Con la entrada en vigor de este Tratado, se facilitó la entrada a México de empresas como Smithfield Foods, lo ocasionó una fuerte presión económica sobre las granjas de puercos de pequeña escala.

A partir de 1998 se registró el retiro de productores y el cierre de granjas en aproximadamente 40%, principalmente en el estrato de producción semitecnificada, el cual redujo su participación en la producción del 50% al 15%; mientras que el estrato tecnificado aumentó su participación del 20% al 57% y el estrato de subsistencia disminuyó ligeramente de 30% a 28%. Lo que corresponde al fenómeno de concentración característico del sector.

Con estos cambios en el panorama productivo de la porcicultura en México, comenzó a consolidarse una industria porcícola muy concentrada en pocas empresas y regiones.

De acuerdo a datos del Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP, 2021) tenemos que en el periodo 2011 a 2020, los cinco estados con mayor número de cabezas de cerdos fueron Jalisco, Sonora, Puebla, Veracruz y Yucatán. En el caso específico de la industria porcícola de Yucatán, está orientada principalmente a la exportación a países asiáticos.

Como se puede apreciar en la Tabla 1, la producción de estos cinco estados pasó del 48.3% en 2011 respecto a la producción nacional, al 57.7% en 2020.

En el Panorama Agropecuario, publicado en 2021 por el Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP, 2021), se reportó la crianza de 18.8 millones de cerdos, alcanzando una producción de 1,652,262 toneladas, que ubicaron a México en el lugar 13° del mundo, con un valor de 961 millones de dólares.

De acuerdo con cifras del 2022, la industria porcícola mexicana tiene un valor de 62 mil millones de pesos y genera más de dos millones de empleos directos e indirectos. (SADER, 2022).

Como ya se mencionó, México es un país deficitario en carne de cerdo y prueba de ello es que cada año importa, principalmente de Estados Unidos, 45% del consumo interno. Sin embargo, los nichos de cortes o productos con márgenes de ganancias mucho más atractivos se destinan a otros países, principalmente asiáticos como es el caso del mercado japonés.

Algunos de los factores que han contribuido al incremento en la importación de carne de cerdo, aún con un comportamiento positivo en la producción nacional, están relacionado principalmente con deficiencias en la producción local y el incremento en el consumo. Tan sólo en 2017, la importación de carne de cerdo ascendió a los 1.405 millones de dólares. Gracias a la importación, principalmente de Estados Unidos, Canadá y España, el mercado porcino de México puede cubrir gran parte de las necesidades de la población y de la industria alimentaria (Rotecna, 2020).

Las importaciones de carne de cerdo se destinan especialmente a la industria alimentaria, donde las procesadoras de carne la transforman antes de distribuirla al consumidor final. Además de todas las importaciones de carne, el país también está importando cerdos vivos a tasas más altas.

Asimismo, los programas de mejora genética son cada vez más importantes para la industria porcina, ya que los principales productores buscan formas de desarrollar mejores líneas genéticas con el objetivo de mejorar la productividad y la calidad de la carne (Rotecna, 2020).

Por otro lado, cabe señalar que el dinamismo de la industria porcícola, no se da en forma asilada, sino que está estrechamente ligado a la agricultura intensiva. Las empresas dominantes tienden a





integrar ambos procesos, haciendo uso del territorio y de los recursos naturales que concentran.

La abundancia de insumos como el agua, sumado a su ubicación geográfica estratégica de salida

hacia Estados Unidos y Asia, desde el puerto de Progreso en Yucatán, ofrecen condiciones ventajosas para la industria.

Tabla 1. Evolución del inventario en los principales estados porcícolas, 2011 - 2020

Estado	Año 2011	Año 2014	Año 2017	Año 2020
Jalisco	2,567,226	2,772,762	3,305,214	3,898,760
Sonora	1,671,536	1,734,754	1,816,960	2,049,454
Puebla	1,246,589	1,628,686	1,839,131	1,923,724
Veracruz	1,109,145	1,544,381	1,589,695	1,820,193
Yucatán	918,959	956,554	1,071,571	1,160,091
Total 5 Estados	7,513,455	8,637,137	9,622,571	10,852,222
Total Nacional	15,547,260	16,098,680	17,210,269	18,788,002
% del total	48.3%	53.6%	55.9%	57.7%

Fuente: Elaboración propia a partir de datos del SIAP

Porcicultura en Yucatán

Históricamente el mercado porcícola del estado de Yucatán había sido deficitario para cubrir la demanda regional. En sus intentos por diversificar la economía del estado debido a la crisis de la industria henequenera, el gobierno de Yucatán comenzó a impulsar la porcicultura a fines de la década de los sesenta.

Entonces comenzó el impulso a la porcicultura de pequeña escala, mediante apoyos del gobierno estatal, como la entrega de sementales y créditos para la producción. De acuerdo con Drucker, *et al* (2003), en esta primera etapa de porcicultura familiar, los lechones producidos se comercializaban a los diez o doce kilos a través del Banco Agrario de Yucatán y se entregaban entre uno y cuatro vientres por familia.

En 1975 comenzó la segunda etapa de impulso a la porcicultura en Yucatán, al construirse 151 granjas colectivas, con una capacidad que fluctuaba de 24 a 156 vientres. Se construyeron centros de acopio, a

fin de obtener animales de crianza y, posteriormente, distribuirlos entre los centros de engorda.

A partir de los ochenta, un número mayor de porcicultores privados se dedicaron a esta actividad. En 1982 existió un déficit de producción de carne de 3,662 toneladas. En ese año la porcicultura representaba 8.2 del valor obtenido por el subsector pecuario en el estado. Así, se siguieron destinando fondos a la construcción de infraestructura porcícola ejidal. El mercado interno estaba protegido, con precios de garantía al productor y precios oficiales al consumidor. Históricamente el mercado porcícola había sido deficitario para cubrir la demanda regional.

A partir de los noventa, y en el contexto de la firma del TLCAN, referido anteriormente, la producción de cerdo tuvo un crecimiento acelerado. La media de producción de carne en canal pasó de 17,662.2 toneladas entre 1984 y 1992, a 38,278.6 en 1993 y 1994, con lo que se cubrió el 95% de la demanda regional.





Esto se debió a la participación de capital privado, que modificó en términos técnicos, económicos y financieros los procesos productivos con “megaproyectos”, así como el establecimiento de nuevos esquemas asociativos entre particulares y ejidatarios.

De acuerdo con Llanes Salazar (2017), la construcción del Puerto de Altura de Progreso durante el primer gobierno de Víctor Cervera Pacheco permitió la recepción de más de 20 mil toneladas de granos, lo que impulsó la industria porcícola a mayor escala. Asimismo, en la década de los noventa, el gobierno federal de Ernesto Zedillo impulsó la creación de clústers industriales en el país, y en Yucatán privilegió la producción de carne de cerdo, res y pollo.

Desde entonces, y las últimas décadas, la porcicultura se ha constituido como una de las actividades económicas que han sido promovidas por las autoridades del Gobierno de Yucatán.

Los números indican que la producción de la península va en aumento, ya que esta industria crece a 4.5 % anual, un porcentaje incluso mayor que el de Sonora y Jalisco (que presentan un crecimiento del 2.6 y 1.7 %, respectivamente), estados que, históricamente han ocupado los primeros lugares de producción de carne de cerdo en México (OCDE, 2019).

En 2017 los datos de SIAP-SADER para la producción porcina en Yucatán reportaron 1,670,053 cabezas; mientras que en 2018 subió a 1,736,994 cabezas (De los Ríos, 2020). En 2020, la actividad pecuaria porcina en toda la península de Yucatán produjo 1,819,970 cabezas y presentó un ingreso de 7,241.4 millones de pesos.

Por otra parte, en lo que respecta al comportamiento de la industria porcícola en el estado de Yucatán, la cría de cerdos ha proliferado en gran medida, gracias al modelo de “aparcería”, impulsado por Grupo Porcícola Mexicano (Kekén); en el que porcicultores tradicionales invierten en infraestructura

para cumplir lo que solicita el grupo empresarial, a partir del otorgamiento de créditos, ocupando los alimentos de su propia planta y bajo estrecha supervisión de la empresa.

Una vez hecha la obra, la empresa proporciona lechones y alimento a los porcicultores, que se dedican a engordarlos y cuidarlos en las instalaciones de los aparceros; al final, la empresa les compra todos los cerdos y continúa el ciclo de producción, otorgándoles nuevamente lechones para seguir el proceso de engorda.

A este sistema se le denomina “*Wean to Finish*” que consiste en el traslado de los lechones recién destetados desde las naves de maternidad, a las instalaciones donde serán alimentados y cuidados, hasta el sacrificio que, oscila entre los 160 a los 170 días.

A grandes rasgos, este proceso de vida del cerdo comercial se divide en tres etapas:

- Sitio I.- Lechones de 1 a 19 días de nacidos, tendrán un peso promedio de 5 kilogramos.
- Sitio II. - Lechones destetados de 20 a 60 días de nacidos tendrán un peso promedio de 6 a 20 kilogramos.
- Sitio III. - Cerdos de 61 a 160 días de nacidos los cuales se conocen como cerdos finalizados para sacrificio con un peso promedio de 110 - 130 kilogramos.

Aunado a los factores ya mencionados, la riqueza natural del estado de Yucatán, por su abundancia en el recurso hídrico y sus características ecosistémicas, que lo convierten en un buffer que repele fácilmente la propagación de enfermedades, como la PPA, así como la ventaja comercial de poseer una salida marítima hacia la ruta comercial con el continente asiático, han sido elementos sustanciales que determinan en gran medida el crecimiento de la industria porcícola en Yucatán.





4. CARACTERIZACIÓN DE LA ACTIVIDAD PORCÍCOLA EN YUCATÁN

Considerando el ritmo de crecimiento de la industria porcícola en Yucatán, a la par de la importancia geológica, ambiental y ecosistémica del estado de Yucatán; así como la importancia de generar información robusta y actualizada sobre el crecimiento de la actividad porcícola en el Estado, esta sección presenta los resultados de la labor de investigación que realizó la SEMARNAT con el propósito de caracterizar el estado actual de la actividad porcícola en el Estado.

Dada la diversidad de cifras reportadas sobre la cantidad de granjas porcícolas establecidas en Yucatán, observada tanto en publicaciones y estudios (Greenpeace, 2020), como en lo reportado por fuentes institucionales a nivel federal y estatal; la SEMARNAT, a través de la Dirección General de Recursos Naturales y Bioseguridad, se dio a la tarea de realizar una ardua labor de investigación documental, de gabinete y en campo a través de entrevistas a personas servidoras públicas estatales académicos y sector privado en relación a la industria porcícola del Estado.

Con base en la información recuperada a lo largo de siete meses de trabajo de investigación, se recopiló información de las siguientes fuentes:

- La Delegación de Yucatán de Semarnat.
- Dirección General de Recursos Naturales y Bioseguridad.
- Registro Público de Derechos del Agua de Yucatán.
- GeoComunes.
- Organismo de Cuenca de la península de Yucatán de la Comisión Nacional del Agua.
- Delegación de Yucatán de la Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural.
- Asociación Local de Porcicultores.
- Grupo Porcícola Mexicano.
- Secretaría de Desarrollo Sustentable de Yucatán.
- Secretaría de Desarrollo Urbano y Medio Ambiente.

Metodología

A partir de una primera etapa de revisión de literatura, bases de datos y fuentes documentales oficiales, se llegó a la identificación de notorias divergencias en las cifras reportadas sobre las granjas porcícolas existentes en Yucatán. Por ello, se planteó la necesidad de obtener una estimación lo más apegada posible a la cifra actualizada del número de granjas existentes en el estado, así como su georeferenciación. Esto con el objetivo de conocer su ubicación y las características del entorno en el que se establecen, para identificar posibles zonas vulnerables a la contaminación ocasionada por las externalidades de esta actividad, con posibles afectaciones tanto ecosistémicas como sociales.

Para ello, se dio inicio a una segunda etapa, a partir de la compilación de la información obtenida, en la primera etapa, se llevó a cabo un ejercicio de comprobación y filtrado, utilizando herramientas de visualización geoespacial en programas como google maps y Qgis.

A través de la observación de las coordenadas geográficas de ubicación de las granjas, se llevó a cabo la comprobación de aquellas que correspondían a granjas porcícolas, utilizando como guía dos criterios: el primero, aquellos sitios donde se visualizaron naves de granjas; y segundo, los sitios donde si bien no se apreciaban naves, efectivamente existía la posibilidad de encontrar granjas de traspatio o de autoconsumo.

Una vez comprobadas las localizaciones, se comparó la información previamente compilada y obtenida de distintas fuentes respecto a una misma ubicación, con el objetivo de integrar datos, relacionarlos y, en lo posible, llenar vacíos de información.

Posteriormente, se le asignó una nomenclatura a cada granja, para poder identificarlas de manera sistemática. Finalmente, con esta información se elaboró una base de datos maestra donde se omite información duplicada y se visualiza toda la información recopilada disponible sobre las características de las granjas y sus coordenadas, además de las observaciones realizadas mediante las herramientas de visualización geoespacial.



Los resultados arrojados por este ejercicio de filtración y análisis de los datos, dieron como resultado 507 coordenadas de posibles granjas, sobre las cuales a continuación se ahonda sobre sus características a partir de un análisis numérico descriptivo.

Es preciso mencionar que dadas las limitantes de las herramientas de visualización para identificar de manera certera e incuestionable, la existencia y funcionamiento de las granjas, se precisa que son 507 coordenadas de posibles granjas.

Lo anterior, tomando como consideración que sólo mediante su visita presencial será posible confirmar la existencia de las granjas identificadas como de traspatio o de autoconsumo y, que para el caso de las granjas tecnificadas y semitecnificadas que cuentan con infraestructura más detallada como el número de naves, sólo mediante la visita se podrá corroborar si en efecto todas las naves se encuentran

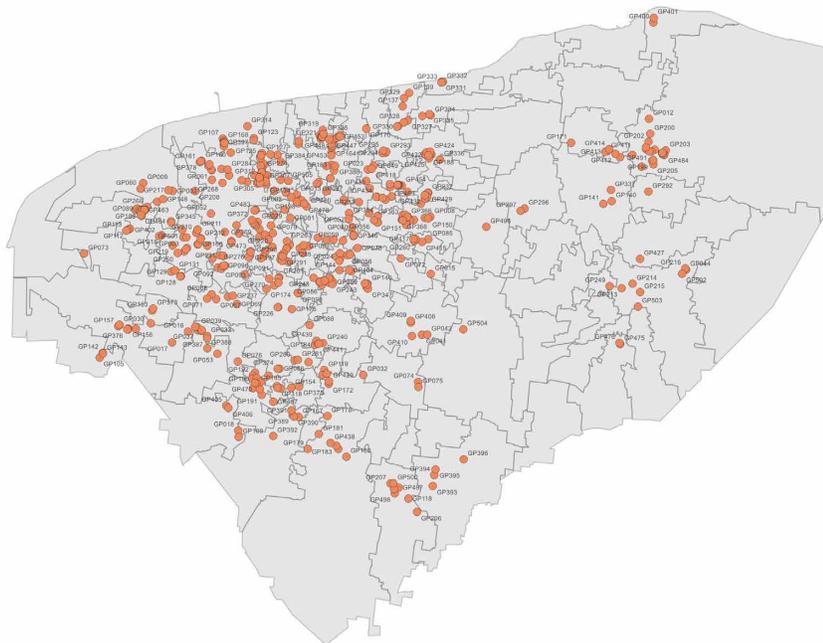
en funcionamiento y si en efecto corresponden a la industria porcícola.

Como una tercera etapa en el proceso de investigación referido, a partir de la base de datos maestra generada, se elaboró un Sistema de Información Geográfica (SIG) que facilita la visualización de los datos obtenidos en un mapa. Esto con el fin de relacionar fenómenos y características geográficas del entorno, así como realizar consultas de manera sistemática y representar los resultados geográficamente de modo ágil e intuitivo.

Hallazgos

Al respecto, en la Figura 1. Se puede apreciar el mapa del Estado de Yucatán dividido por municipios y las nomenclaturas asignadas a las 507 coordenadas de posibles granjas porcícolas.

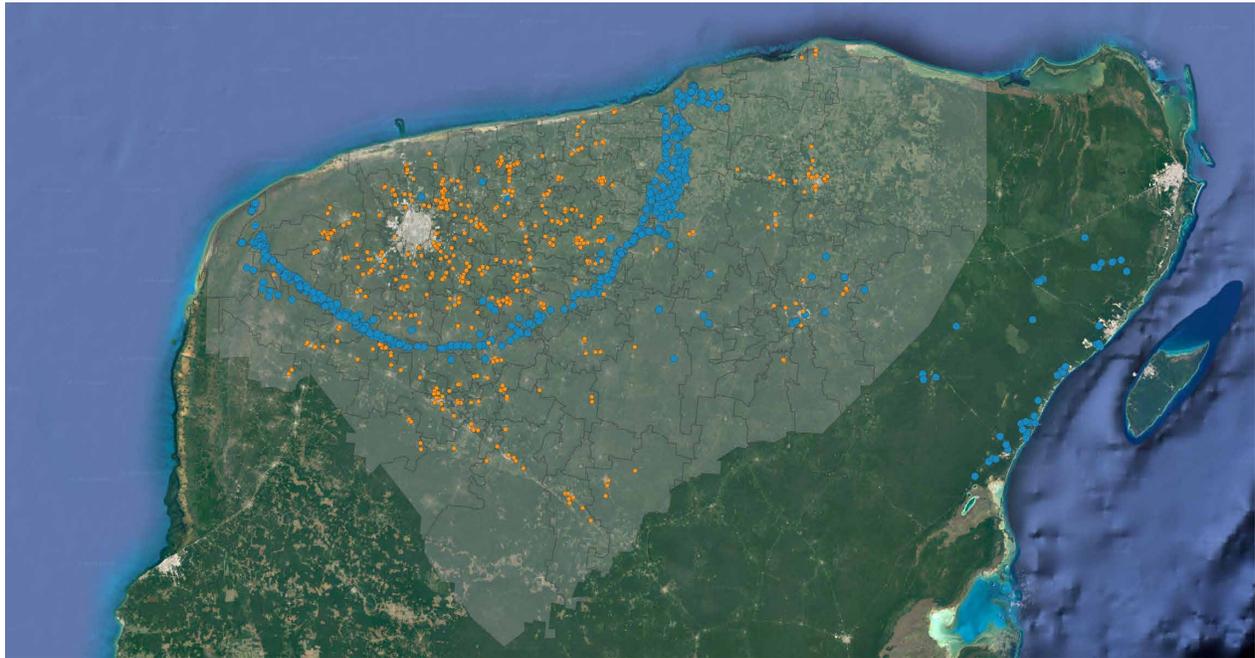
Figura 1. Geolocalización de 507 coordenadas correspondientes a posibles granjas porcícolas en Yucatán con su nomenclatura de identificación



Sobrepuesta a la capa de las 507 coordenadas de granjas se agregó un mapa base para tener una mejor percepción del entorno y poder generar un análisis más profundo, tomando en cuenta la cercanía de éstas con diferentes puntos de interés.

En la Figura 2. Se puede apreciar la distribución geográfica de las 507 coordenadas y su cercanía al Anillo de Cenotes, importante por sus características geológicas y ecosistémicas para la región de la península.

Figura 2. Geolocalización de 507 coordenadas correspondientes a posibles granjas porcícolas en Yucatán y Anillo de Cenotes.

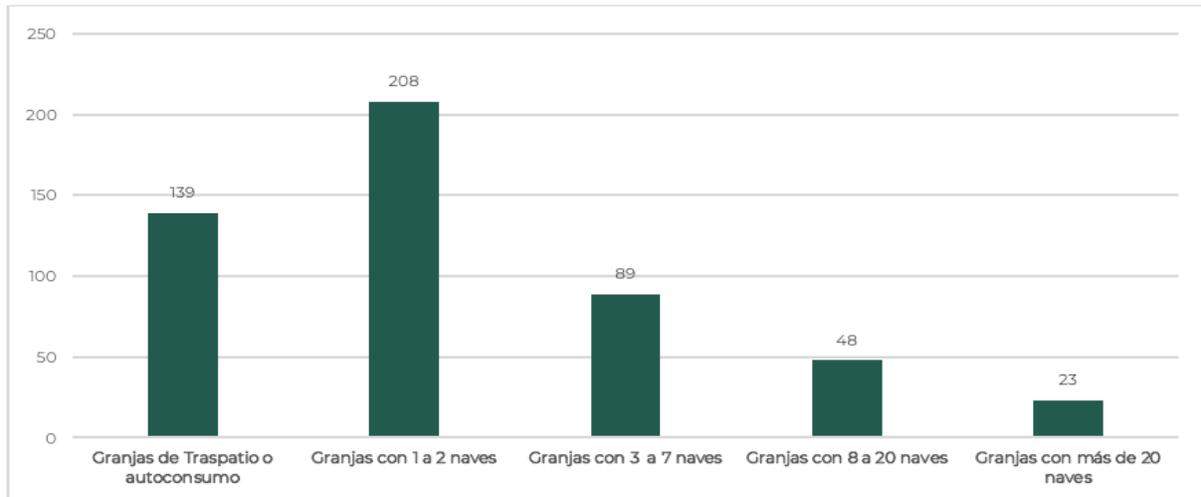


Capacidad de producción

Con ayuda de los visualizadores de imágenes satelitales se realizó un análisis para generar una caracterización más detallada de las granjas. Tal y como se aprecia en la Figura 3, con base en las imágenes satelitales se logró identificar el número de naves de las granjas y con base en ello, tener una aproximación de la capacidad de producción de las granjas.

Mediante el análisis geoespacial, fue posible caracterizar las granjas, identificando que, de las 507 coordenadas de posibles granjas, 139 podrían ser de traspasío o autoconsumo, 208 cuentan con 1 a 2 naves, 89 granjas cuentan con entre 3 a 7 naves, 48 granjas cuentan con entre 8 a 20 naves y 23 granjas tienen más de 20 naves instaladas.

Figura 3. Capacidad instalada por número de naves en las 507 coordenadas de posibles granjas.



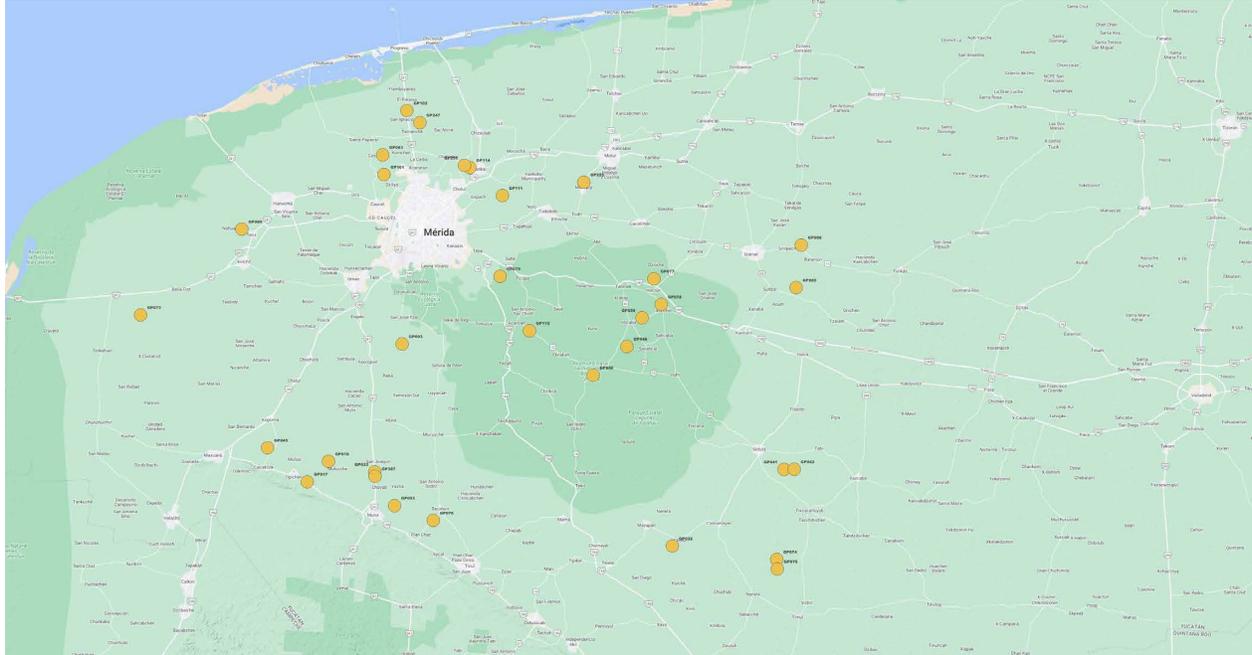
En la Figura 4 se puede observar una de las granjas más grandes por sus dimensiones y capacidad de producción, tal y como se aprecia, cuenta con 10 módulos de 4 naves cada uno, dos biodigestores y varias zonas de riego alrededor de cada módulo,

dadas las características de este tipo de granjas, en el análisis realizado se les denominó Complejos, los cuales tienen como principal característica un número mayor o igual a 8 naves, así como la conectividad de más de un módulo en una misma granja.

Figura 4. Caracterización de una granja tipificada como “complejo” mediante las herramientas de visualización geoespacial.



Figura 5. Mapa de ubicación de complejos con más de 8 naves.



Distribución geográfica de las granjas

Partiendo de la caracterización de las 507 coordenadas de posibles granjas, se realizó un análisis de la distribución geográfica en el estado y su relación con zonas de interés para la conservación ambiental.

En la Figura 6. Se puede observar la distribución de las granjas en los municipios del estado, identificando que, de los 106 municipios en los que se divide el estado de Yucatán, se identificaron coordenadas de posibles granjas en al menos 83 de ellos.

Siendo los municipios de Mérida, Izamal, Tizimín y Acancéh, Tetz, Ticul, Telchac, Tixkokob y Motul, los que registran la mayor concentración de coordenadas de posibles granjas.

Aunado a lo anterior, con el objetivo de contribuir al análisis de la caracterización de las granjas y su distribución geográfica, se realizó un geoproceto de buffer mediante el cual es posible agrupar las coordenadas de granjas identificadas en un radio de 5 km y con ello, facilitar la visualización de la concentración de las mismas, esto se puede observar en la Figura 6.

Con base en este análisis, se puede observar que las comunidades donde hay una mayor densidad de granjas son: Conkal, Telchac, Homún, Tizimín, Umán, Chicxulub, Tixkokob, Tetz, Izamal, Ticul.



Figura 6. Buffer de concentración de naves de granjas porcícolas.

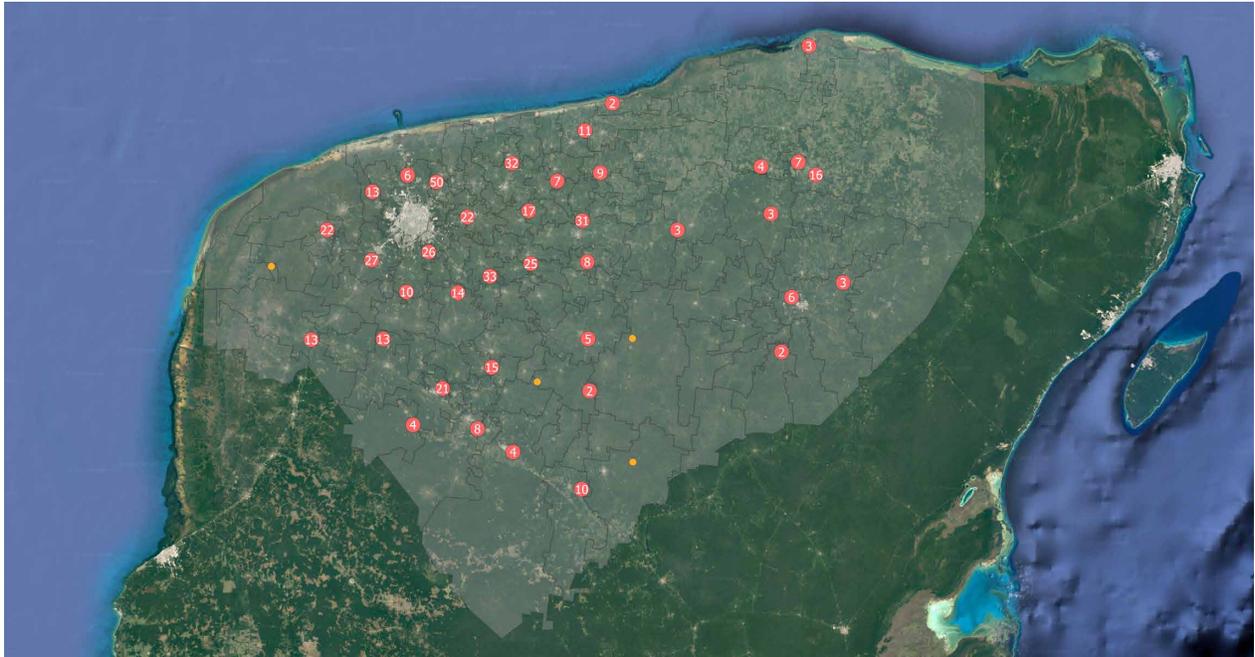




Figura 7. Número de coordenadas de posibles granjas identificadas por municipio.

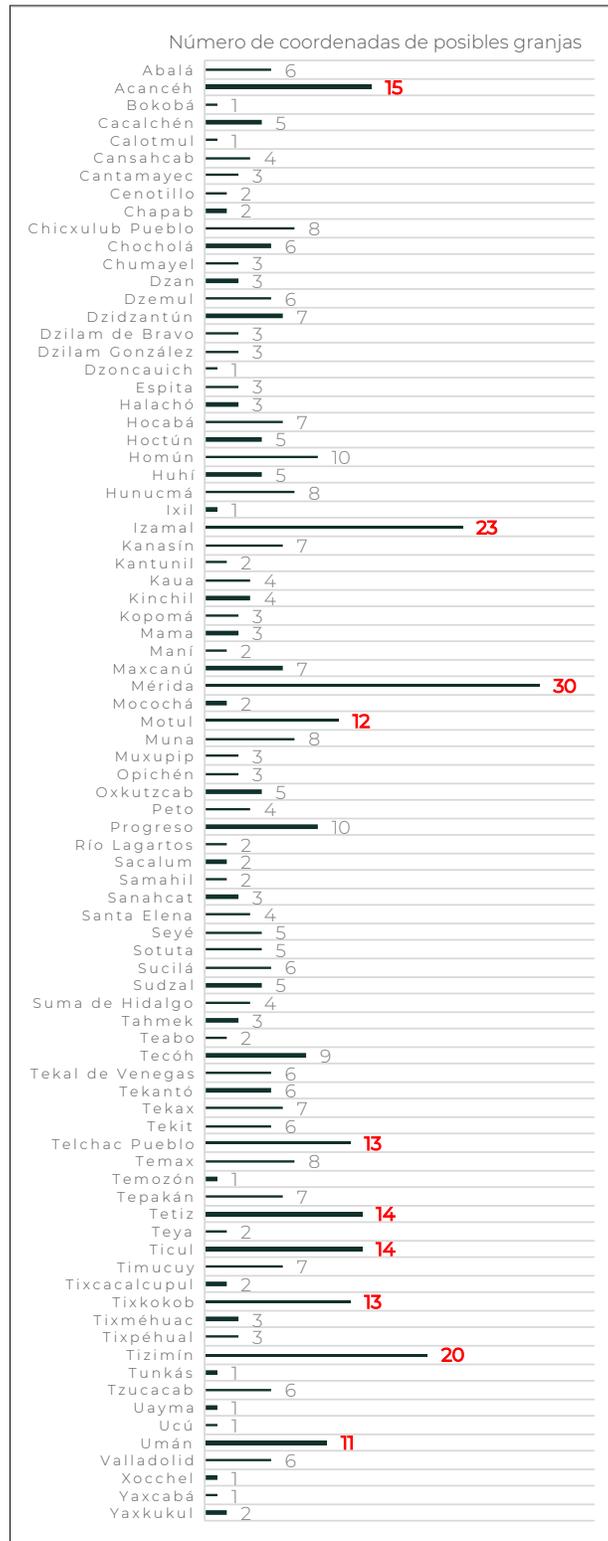




Tabla 2. Comunidades con la mayor concentración de coordenadas de posibles granjas porcinas en un radio de 5km

NOMBRE DE LA COMUNIDAD	NÚMERO DE GRANJAS
CONKAL	27
TELCHAC	22
HOMUN	15
TIZIMIN	15
UMAN	15
CHICXHULUB	15
TIXKOKOB	14
TETIZ	14
IZAMAL	12
TICUL	11

Fuente: Elaboración propia

Con el fin de analizar esta información de manera simultánea a los sitios de interés para la conservación ambiental en el estado de Yucatán, se incorporó una capa al SIG, denominada "Reserva Estatal Geohidrológica Anillo de Cenotes (REGAC)", que como menciona su Decreto de creación, su objetivo es garantizar que los beneficios derivados de los servicios, particularmente hidrológicos, de los ecosistemas contenidos en su territorio se distribuyan de forma equitativa para mejorar la calidad de vida. Además, debido a su importancia ecológica fue declarada Humedal de Importancia Internacional

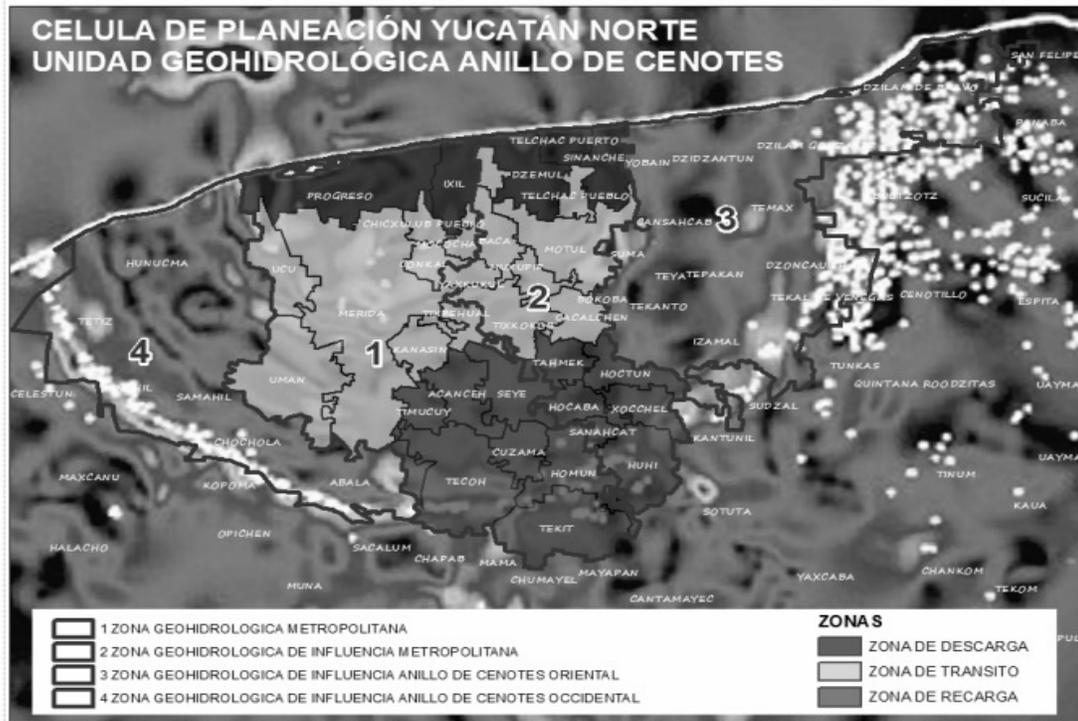
(RAMSAR) el 2 de febrero de 2009, con el número de registro 2,043.

En la Figura 8 se puede apreciar la representación de los 53 municipios que conforman la REGAC conforme a su Decreto, donde se delimitan las zonas, cada una de las cuales tiene una función específica de recarga, tránsito y descarga del acuífero.

A la par se puede apreciar en la Figura 9 el buffer de concentración de granjas por municipio y las cuatro Zonas Geohidrológicas que conforman la Reserva.

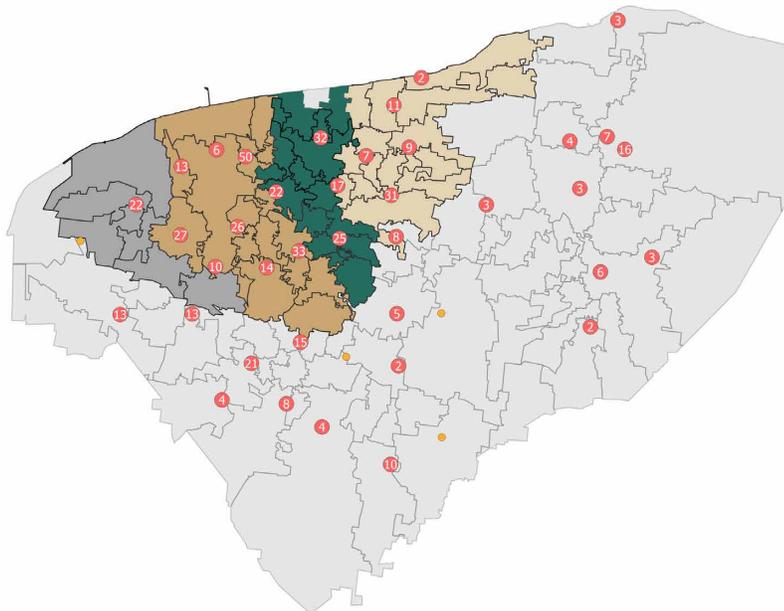


Figura 8. Conformación de la Reserva Estatal Geohidrológica Anillo de Cenotes.



Fuente: Decreto Que Establece El Área Natural Protegida Denominada Reserva Estatal Geohidrológica Del Anillo De Cenotes, 2013.

Figura 9. Mapa de concentración de granjas en la Reserva Geohidrológica Anillo de Cenotes

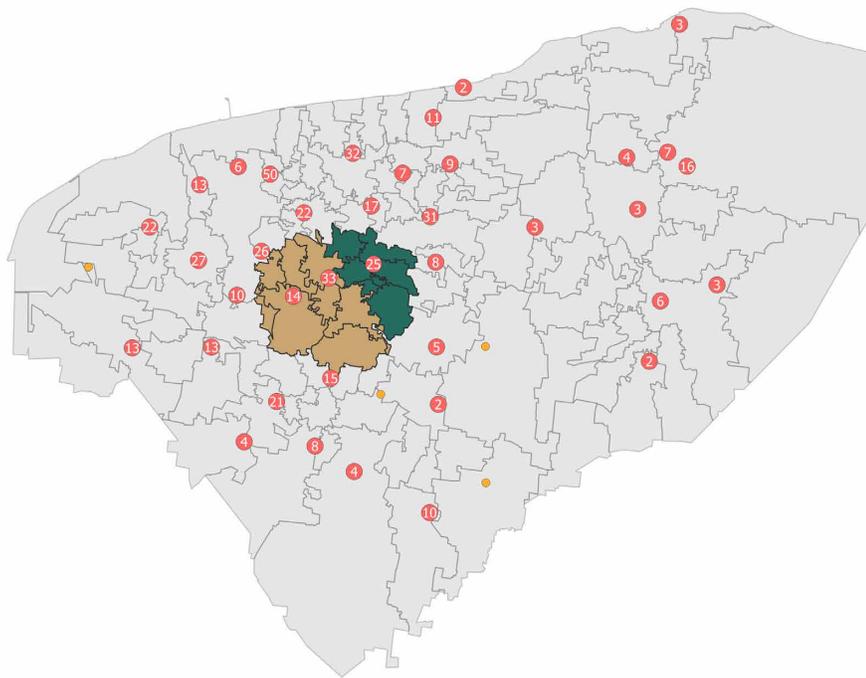


Nota: El área gris corresponde a la Zona Geohidrológica Metropolitana, el área dorada corresponde a la Zona Geohidrológica de Influencia Metropolitana, el área verde corresponde a la Zona Geohidrológica de Influencia Anillo de Cenotes Oriental y el área beige a la Zona Geohidrológica de Influencia Anillo de Cenotes Occidental

Por otra parte, en las Figuras 10, 11 y 12 se puede apreciar de manera más detallada las Zonas de Recarga, de Tránsito y de Descarga que conforman la REGAC y el buffer de concentración de granjas. Con base en la Tabla 3 se puede identificar que, en la Zona de Recarga, que como se refirió en el apartado de Fundamento Legal, es la única que tiene el

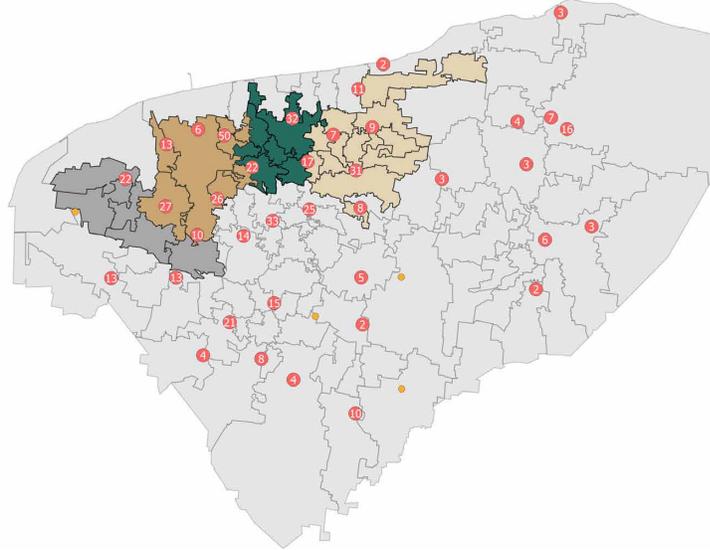
carácter de protección de Reserva Estatal, se observan un total de 77 coordenadas de posibles granjas y 323 naves, siendo los municipios de Acancéh y de Hochtún, los dos municipios dentro de esta Zona con mayor capacidad de producción instalada a partir de la identificación del número de naves.

Figura 10. Mapa de concentración de granjas en la Zona de Recarga de la Reserva Geohidrológica Anillo de Cenote



Nota: El área color dorada corresponde a la Subzona de Recarga 1 y el área color verde corresponde a la Subzona de Recarga 2.

Figura 11. Mapa de concentración de granjas en la Zona de Tránsito de la Reserva Geohidrológica Anillo de Cenotes

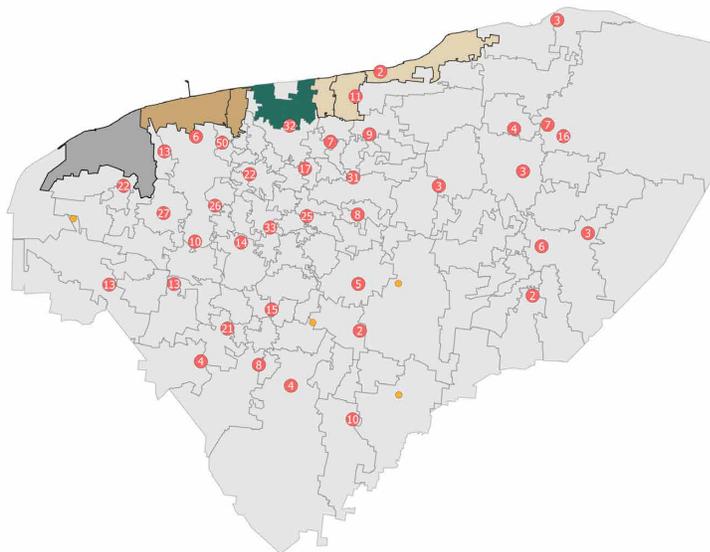


Nota: El área de color gris corresponde a la Subzona de Tránsito 4, el área color dorada corresponde a la Subzona de Tránsito 1, el área de color verde corresponde a la Subzona de Tránsito 2 y el área de color beige corresponde a la Subzona de Tránsito 3.

En tanto que, en la Zona de Tránsito, como se puede observar en la Figura 11 y en la Tabla 3, se identificaron 242 coordenadas de posibles granjas y 854 naves de producción instaladas, al respecto destacan

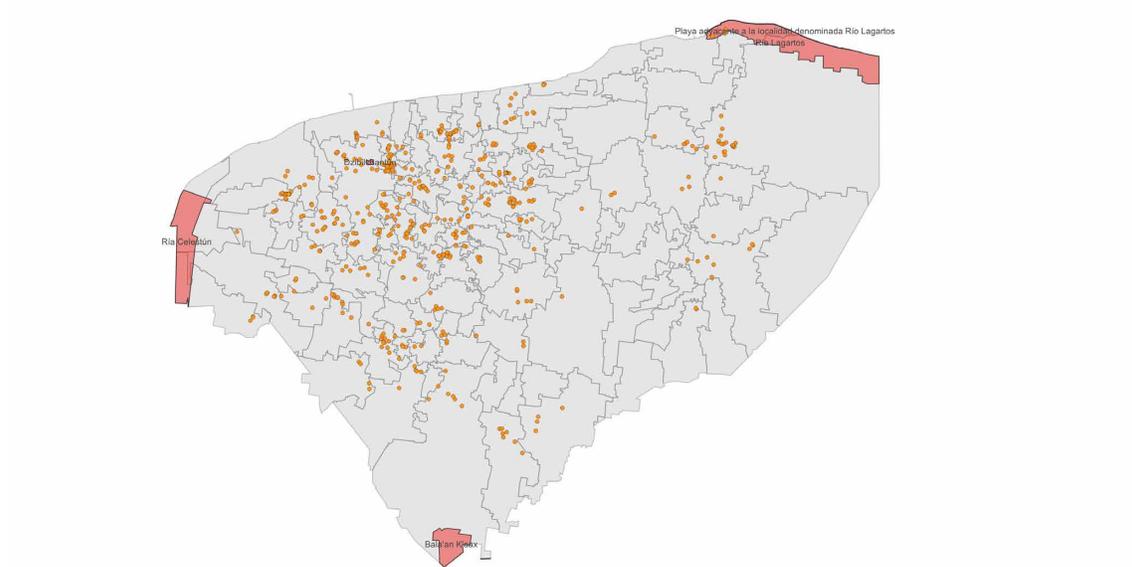
los municipios de Mérida, Conkal, Umán y Tetiz, como los municipios donde hay mayor densidad de capacidad instalada, identificada a partir del número de naves observadas en la geovisualización.

Figura 12. Mapa de concentración de granjas en la Zona de Descarga de la Reserva Geohidrológica Anillo de Cenotes



Nota: El área de color gris corresponde a la Subzona de Descarga 4, el área color dorada corresponde a la Subzona de Descarga 1, el área de color verde corresponde a la Subzona de Descarga 2 y el área de color beige corresponde a la Subzona de Descarga 3

Figura 13. Ubicación de coordenadas de posibles granjas en Áreas Naturales Protegidas



Aunado al análisis de distribución geográfica de las 507 coordenadas identificadas como posibles granjas en la Reserva Estatal Geohidrológica Anillo de Cenotes, en la Figura 13, se identificaron las Áreas Naturales Protegidas en donde fue posible observar al menos 3 coordenadas de posibles granjas en Ría Lagartos.

Por último, con el objetivo de analizar la distribución de las coordenadas de posibles granjas respecto al cumplimiento de la normativa ambiental federal en materia de agua, con base en información provista por el Organismo de Cuenca de la península de Yucatán, se generó una capa adicional en la que se

identifican los 205 títulos de aprovechamiento de CONAGUA relacionados a la actividad de granjas porcícolas y que, asu vez, corresponden a 343 permisos de descargas.

Al respecto, se logró identificar que, del universo de 507 coordenadas de posibles granjas, al menos el 30% cuenta con algún título; no obstante, para más del 60% de las granjas no se logró identificar algún título de concesión o permiso de descarga de aguas residuales.

Figura 14. Ubicación de los títulos de concesión de CONAGUA y las 507 coordenadas de posibles granjas porcícolas.



Nota: Los círculos color rosa corresponden a las 507 coordenadas de posibles granjas y los círculos color amarillo corresponden a la ubicación de los títulos de concesión de CONAGUA.



Tabla 3. Distribución de coordenadas de posibles granjas y naves identificadas mediante geovisualización en la Reserva Estatal Geohidrológica Anillo de Cenotes.

	Subzona 1			Subzona 2			Subzona 3			Subzona 4		
	Municipio	No.de granjas	No. de naves	Municipio	No. de granjas	No. de naves	Municipio	No. de granjas	No. de naves	Municipio	No.de granjas	No. de naves
Recarga	Seyé	5	11	Tahmek	2	13						
	Acancéh	13	97	Hoctún	5	53						
	Timucuy	7	17	Xocchel	1	18						
	Homún	10	9	Hocabá	6	21						
	Cuzamá	4	23	Sanahcat	3	38						
	Tecoh	9	14	Huhí	5	2						
	Tekit	6	7									
	Subtotal	54	178	Subtotal	22	145						
Tránsito	Chicxulub Pueblo	8	27	Motul	12	41	Dzilam González	3	1	Tetiz	14	106
	Mocochá	2	5	Telchac Pueblo	13	24	Temax	8	2	Samahil	2	4
	Mérida	31	220	Bacaa	0	0	Cansahcab	4	1	Kinchil	4	16
	Ucú	1	2	Muxupip	3	23	Dzoncauich	1	0	Chocholá	6	15
	Conkal	28	67	Yaxkukul	2	4	Suma de Hidalgo	4	27	Abalá	6	45
	Tixpehual	3	11	Tixkocob	13	38	Tepakán	7	12			
	Kanasín	11	28	Cacalchén	5	36	Teya	2	0			
	Umán	17	63				Tekal de Venegas	6	5			
							Takantó	2	11			
							Bokobá	1	2			
						Izamal	23	18				
	Subtotal	101	423	Subtotal	48	166	Subtotal	61	79	Subtotal	32	186
Descarga	Ixil	1	2	Sinanché	0	0	Dzilam de Bravo	3	1	Hunucmá	8	36
	Progreso	10	47	Telchac puerto	0	0	Dzidzantún	6	7			
				Dzemul	6	9	Yobain	0	0			
	Subtotal	11	49	Subtotal	6	9	Subtotal	9	8	Subtotal	8	36
TOTAL	166	650	76	320	70	87	40	222				





5. DIAGNÓSTICO DE CALIDAD DEL AGUA

En todo el mundo, la industria ganadera consume cerca del 35% de la producción de cultivos (FAO, 2020), un tercio del volumen total del agua utilizada en la agricultura (Hoekstra y Mekonnen, 2012) y un quinto del agua virtual que se transfiere entre países a consecuencia del comercio internacional de productos alimenticios (Hanasaki *et al.* 2010). Esta importante huella ambiental en el planeta, es resultado del incremento durante 2008 y 2017 en el consumo individual de estos productos en un 19% y el número de habitantes que viven en países de renta media en 29% (FAO 2020).

De esta manera, el continuo incremento en la producción de carne y su comercio internacional, tendrá un efecto directo en la intensificación de la crisis hídrica de países productores y exportadores de carne que al día de hoy sufren de escasez de agua. Es previsible entonces, que esto dará como resultado dificultades en el aseguramiento de la producción de alimentos y animales en países que enfrentan escenarios de falta de agua y degradación de suelos (Chung *et al.*, 2020; Godfrey *et al.*, 2018).

La producción de alimentos utiliza una gran cantidad de recursos naturales, como es el agua (Gerbens-Leenes *et al.* 2010). En específico, los productos de origen animal son más intensivos desde el punto de vista hídrico que aquellos que tienen un origen vegetal (Liu y Savenije, 2008). Por esta razón, la transición nutricional que ya se aprecia en muchos lugares del mundo, que registra un cambio de dietas hacia patrones de consumo que contienen productos de origen animal implica un mayor consumo de agua (Grigg 1995, Popkin, 2002).

El consumo de agua y su contaminación por parte de la actividad porcícola en el estado de Yucatán, puede ser evaluada a través del diseño de muestras de calidad del agua a cuerpos de agua vecinos de las granjas porcícolas y también a través del concepto de huella hídrica, que identifica la cantidad de agua consumida durante la producción de un bien o producto (Hoekstra *et al.*, 2011). En el caso de la actividad porcícola, la huella hídrica de la alimentación de los cerdos, está compuesta de consumos directos e indirectos de agua.

La huella hídrica directa representa el agua utilizada por los animales para beber, su limpieza y otros servicios, así como para diluir las concentraciones de contaminantes presentes en el excremento

animal. La huella hídrica indirecta mide la cantidad de agua necesaria en la producción de los cultivos que sirven de alimento a los animales a lo largo de su ciclo de vida (Hoekstra *et al.*, 2011).

Dependiendo de las diferentes fuentes de abastecimiento de agua, la huella hídrica puede también dividirse en huella hídrica azul (ej. agua superficial o subterránea), huella hídrica verde (ej. agua de lluvia) y huella hídrica gris (ej. la cantidad de agua necesaria en un río o acuífero para asimilar una carga contaminante producida por las actividades humanas). De esta manera, la suma de las huellas hídricas azul y verde, representan un uso consuntivo del agua, mientras que la huella hídrica gris representa la degradación del agua en su calidad (Hoekstra, 2013).

Además de las consideraciones sobre la huella hídrica de la industria porcícola, es necesario considerar que un cerdo en su edad adulta produce, según su talla y peso entre 4 y 10 veces los residuos que genera una persona adulta.

En el caso de nuestro país, en 2019 se registró una población de 18.60 millones de cerdos, que corresponden a la generación de excremento del 50% de la población total de México. Mientras que, en 2020, el número de cerdos se incrementó con una capacidad de generar una cantidad de excretas comparables a las que produce el 68% de la población total del país.

La gran diferencia, es que por lo general los residuos humanos son tratados en sistemas municipales de drenaje y aguas residuales, que están sujetos al cumplimiento de normas ambientales (ej. NOM-001-SEMARNAT-2021). En contraste, no existe un requerimiento ambiental para el manejo de los residuos animales almacenados en fosas y aplicados sin tratamiento como fertilizante dentro de los campos de las mismas granjas. En este sentido, cabe destacar que, ya que los excrementos de los cerdos contienen nitrógeno y fósforo, representan importantes fertilizantes para cultivo, no obstante, al mismo tiempo resultan tóxicos en exceso. Además contienen bacterias como *E.coli*, residuos de antibióticos, metales pesados, sangre animal y otros químicos (Hribar, 2010).

La industria porcina internacional ha expandido el uso de las operaciones de alimentación concentradas, bajo el argumento de que es posible un ciclo cerrado para los residuos, ya que los excrementos





producidos por los cerdos, son utilizados como fertilizante en los cultivos de la misma granja y los cerdos a su vez usan como alimento estos cultivos.

Lo cierto, es que el volumen de los excrementos rebasa por mucho la concentración de nutrientes que requieren los cultivos y también rebasa la capacidad de la tierra para absorberlos. Todo el exceso de excremento que ya no es utilizado por los cultivos (con los elementos que contiene) escurre sobre la tierra, infiltrándose hacia cenotes, acuífero y también a los pozos de agua, lo que pone en riesgo la calidad del agua de fuentes de abastecimiento para todas las personas y actividades económicas que coexisten en el territorio con la granja.

En el caso del estado de Yucatán, la principal fuente de abastecimiento de agua es su acuífero, el cual presenta cualidades específicas que le otorgan una alta conductividad hidráulica. Esto se debe a las rocas calizas y evaporitas que conforman la península de Yucatán poseen una alta permeabilidad secundaria que permiten el paso de las lluvias, y también de otros líquidos derramados en su superficie.

Sabemos que el flujo del agua subterránea en la península de Yucatán se desplaza desde el centro de la península y hacia las costas, a través de conductos que se encuentran comunicados entre sí, de tal manera que los contaminantes vertidos en un lugar afectan a otros varios más en su camino (Langer, 2001). Por esta razón, si bien no hay un problema de disponibilidad de agua en el estado de Yucatán, sus características kársticas las hacen muy vulnerables a procesos de contaminación.

Justamente esta fragilidad de los sistemas kársticos, nos obligan a poner particular atención al desarrollo de esta actividad pues los excrementos de cerdos contienen nitrógeno y fósforo que en altas concentraciones resultan tóxicos a la vida acuática y a la salud humana. Al respecto, existen reportes de que, por ejemplo, sólo en Estados Unidos de América, la contaminación por exceso de nitrógeno generada por el ganado porcino se incrementó en 50 % entre los años 1930 y 2012 (Yang *et al.*, 2016).

Entre las preocupaciones ambientales más importantes por la presencia de granjas porcícolas en el mundo están:

1. **Eutrofización de cuerpos de agua superficial.** Resultado de altas concentraciones de nitrógeno y fósforo en el agua y que dan lugar a crecimientos algales acelerados, estos a su vez tienen el potencial de eliminar por completo el oxígeno de los cuerpos de agua y con ello arrasar con todo ser vivo. Este tipo de problemática fue detectada durante la campaña de muestreo realizada en el estado de Yucatán en diversos cenotes que documentaron la presencia de algas, tal y como se aprecia en la Figura 15, que corresponde al cenote de X'tojil.
2. **Lixiviación de nitratos y patógenos.** El escurrimiento e infiltración al acuífero, de altas concentraciones de nitratos y patógenos presentes en las aguas residuales de esta industria, dan lugar a la contaminación de agua y también de suelo, en caso de usar el excremento como fertilizante sin ninguna recomendación técnica para su aplicación.
3. **Exceso de nutrientes y metales pesados.** El no contar con guías para la aplicación del excremento como fertilizante de los cultivos da pie a la aplicación en exceso de estos nutrientes, lo que implica daños a la fertilidad del suelo y por tanto, a la reducción de tierras cultivables.
4. **Emisión de metano, amonio y otros gases.** Un aspecto importante a considerar desde el punto de vista ambiental, es la emisión de gases contaminantes a la atmósfera, lo que tiene el potencial de incrementar el efecto invernadero a un nivel local. En el caso de los cerdos, se sabe que en promedio al año un cerdo produce 21.9 kg de metano (Andersen *et al.*, 2015).
5. **Mala disposición de cadáveres de cerdos.** En otros países la mala disposición de cadáveres de cerdos que sufren algún tipo de enfermedad también ha dado lugar a la degradación de la calidad del agua y la salud ambiental, por lo que en un estado con gran actividad porcina la reglamentación y seguimiento a estas preocupaciones es un deber de las autoridades ambientales.



Figura 15. Cenote X`tojil en el estado de Yucatán.



Por esta razón, el Instituto Mexicano de Tecnología del Agua diseñó una campaña de muestreo que incluyó mediciones de calidad del agua en cenotes y fuentes de abastecimiento subterráneo, a fin de determinar los impactos de la actividad porcícola sobre el acuífero de Yucatán.

Adicionalmente, se incorporan los resultados del monitoreo de descargas de aguas residuales de diez

granjas porcícolas, seleccionadas de manera colegiada entre los industriales, el Gobierno del Estado y la SEMARNAT, con el propósito de determinar si en los ejemplos seleccionados, esta actividad económica cumple con los parámetros establecidos dentro de la normatividad vigente para las descargas de aguas residuales (NOM-001-SEMARNAT-2021).

5.1 Calidad del agua en cenotes y pozos de abastecimiento

En esta sección se presentan los resultados de la calidad del agua subterránea en el estado de Yucatán, considerando las muestras realizadas en pozos y cenotes del estado y con particular énfasis en los parámetros fisicoquímicos y microbiológicos.

El acuífero de la península de Yucatán es un acuífero libre alojado en rocas calizas kárstificadas, con una extensión de aproximada de 124,409 km². El acuífero flota sobre una capa de agua salobre que se extiende desde la línea de costa hasta varias decenas de kilómetros tierra adentro (Escolero *et al.*, 2000). En la Figura 16 se muestra el modelo conceptual, simplificado de funcionamiento del acuífero regional de la península de Yucatán.

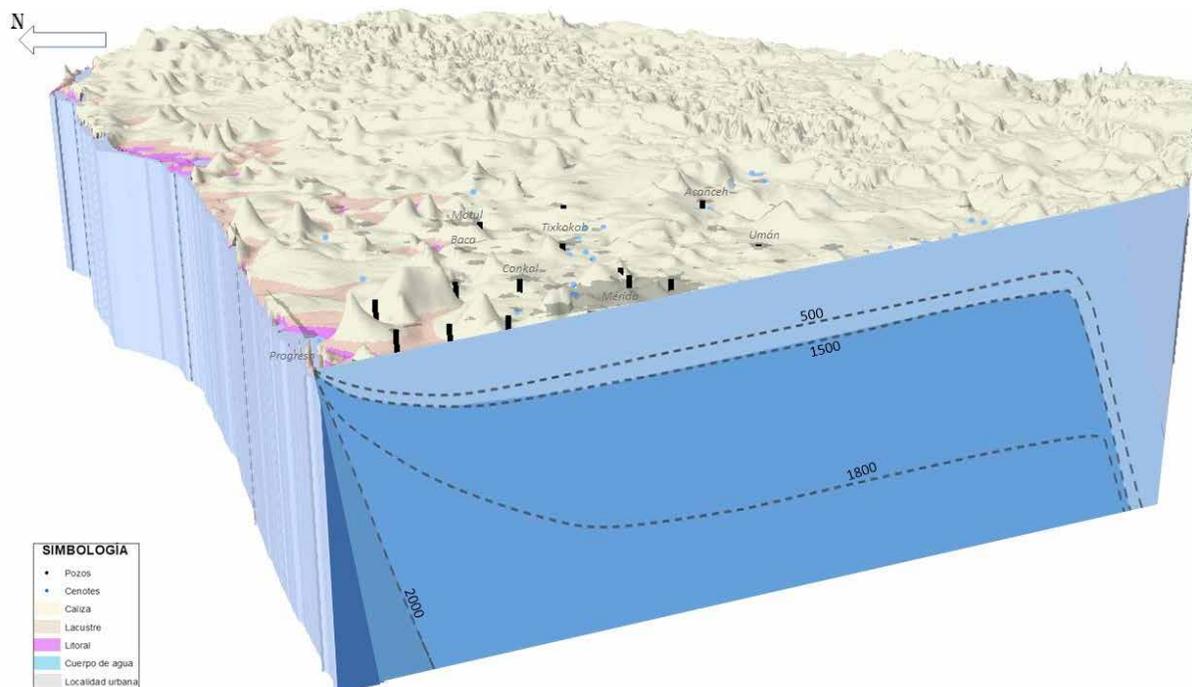
Las mayores profundidades se ubican al este del acuífero, con valores de 30m, disminuyendo en dirección a la línea de costa. En la zona urbana donde se ubica la ciudad de Mérida, la profundidad oscila entre 8 y 4m. Las familias de aguas son de una mezcla entre la interacción del agua subterránea y agua de origen marino, donde las aguas dulces se mezclan con agua marina. Las aguas del acuífero

son predominantemente: bicarbonatada - cálcicas ($\text{HCO}_3\text{-Ca}$) y las de la cuña salina clorurada - sódicas (Cl-Na).

La infiltración en el acuífero de la península de Yucatán es determinante y es la fuente principal de recarga al acuífero. Considerando la karsticidad en la zona y la formación de una permeabilidad secundaria, originada por la disolución de la roca caliza, la lluvia que se infiltra al sistema acuífero y la interacción agua roca, donde existe una disolución de minerales, determinan las propiedades del agua, dando como resultado un agua con concentraciones elevadas de Ca, Mg y bicarbonatos, que en ocasiones rebasarían los límites permisibles de dureza para agua como fuente de abastecimiento.

Por estas características la península de Yucatán y su acuífero, son vulnerables a la contaminación de aguas subterráneas (pozos y cenotes), inducida por actividades económicas como son las granjas agrícolas y pecuarias, que representan fuentes de contaminación por nutrientes y organismos patógenos, así como por el uso de hormonas y antibióticos.

Figura 16. Modelo conceptual simplificado de funcionamiento del acuífero de la península de Yucatán.



Selección de cenotes y pozos de agua para el muestreo

La selección de los pozos y cenotes que fueron muestreados en este estudio se realizó considerando lo siguiente:

- Elevación del nivel estático.
- Dirección de flujo (radial, con dirección a la línea de costa).
- Cercanía con granjas porcícolas (su proporción en número de cerdos);

Los cenotes y pozos de agua seleccionados para ser muestreados, se distribuyen de forma amplia, cubriendo zonas que se diferencian en función del grado de exposición a actividades antropogénicas. A saber: No impactadas, zonas semiurbanas con presencia de industria porcícola, zonas urbanas,

zonas urbanas con presencia de industria porcícola y zonas costeras.

La diversidad de sitios seleccionados en este estudio, ofrece una caracterización diferenciada, de la cual se distinguen zonas con impacto de la industria porcícola, urbana, semiurbana y zonas alejadas. En la Figura 17, se muestra el anillo de cenotes, pozos de la red de medición de CONAGUA y algunas de las granjas porcícolas existentes en el estado de Yucatán.

De esta manera, se eligieron 22 pozos de agua potable y 20 cenotes identificados en la Figura 18 y 19 respectivamente, a fin de realizar el muestreo correspondiente a la calidad del agua.

Figura 17. Pozos de agua potable, cenotes y granjas porcícolas.

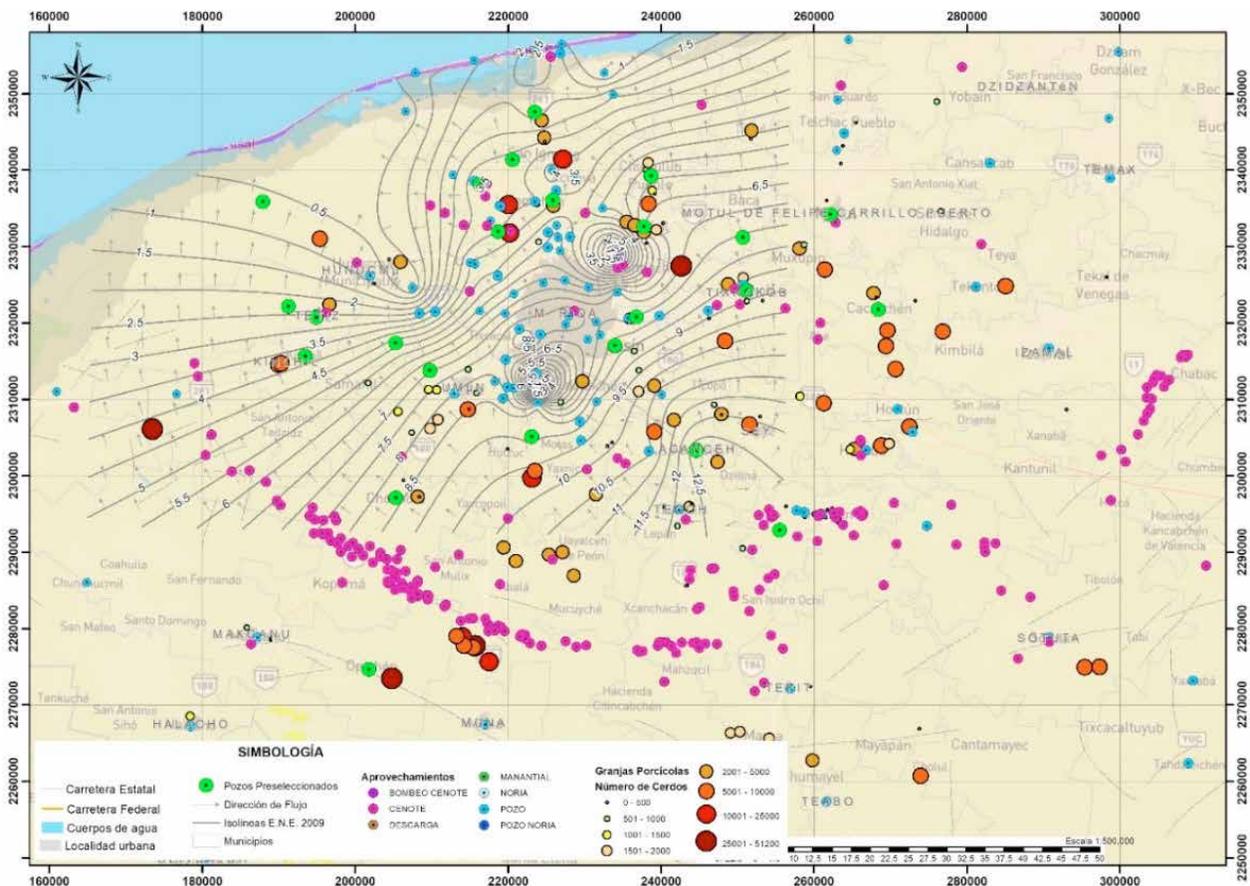


Figura 18. Pozos de agua potable muestreados

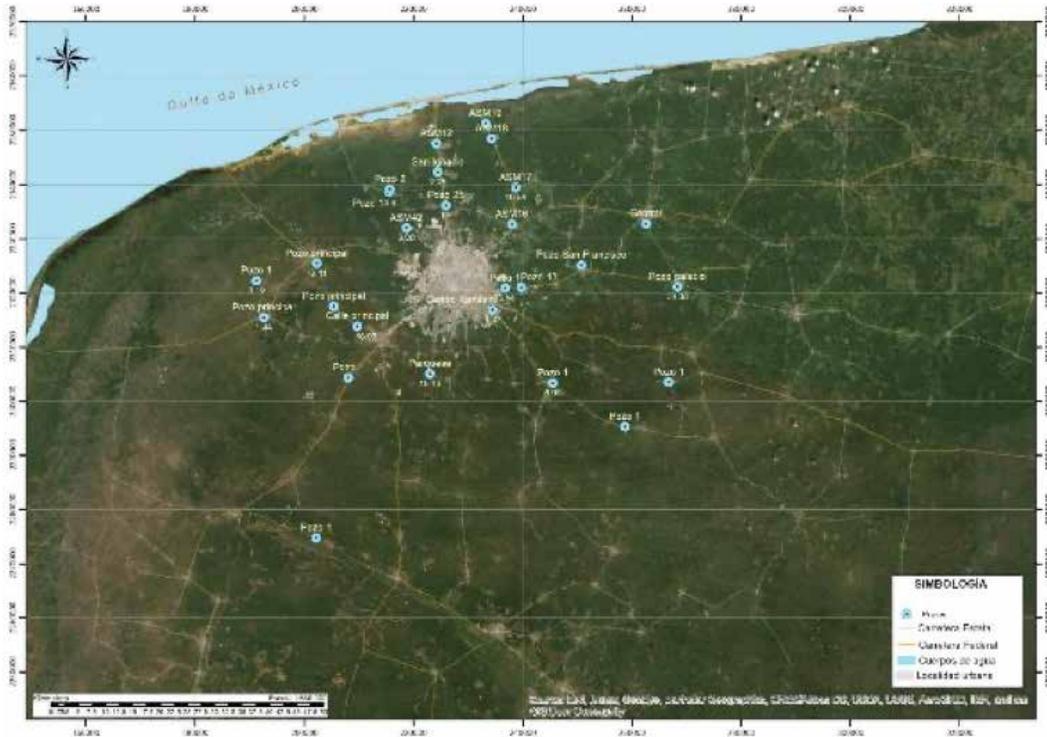
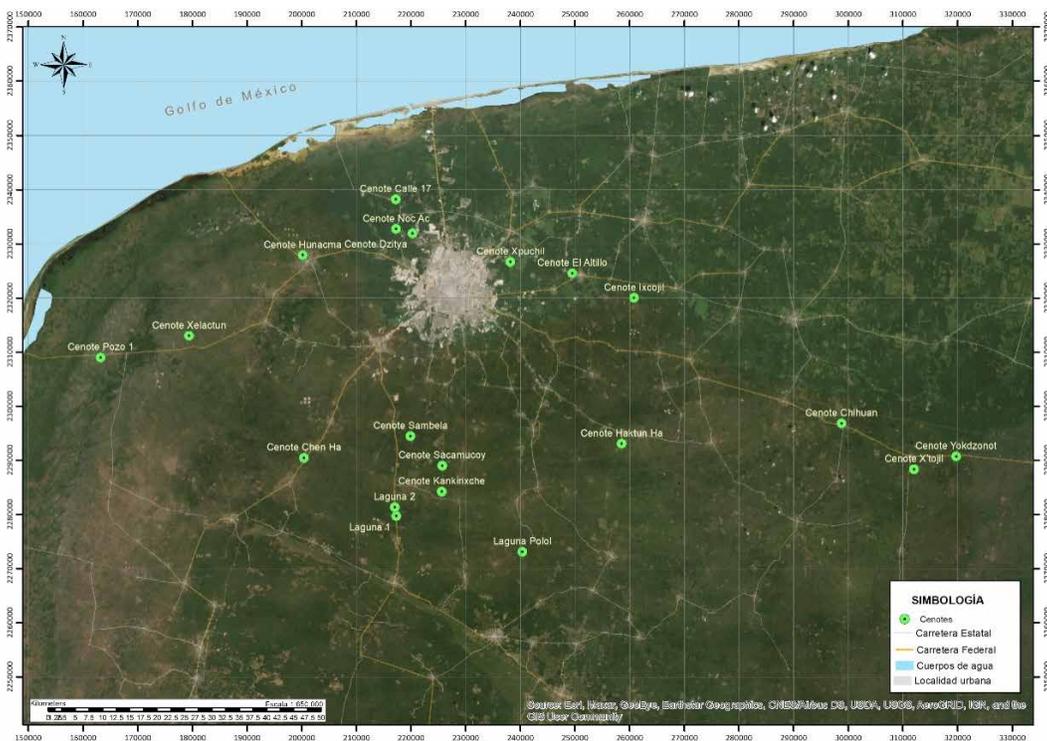


Figura 19. Ubicación de los Cenotes muestreados.





Metodología del muestreo

El procedimiento de muestreo en pozos de agua, fue de acuerdo a lo establecido en la NOM-230-SSAI-2002, Salud ambiental. Agua para uso y consumo humano, requisitos sanitarios que se deben cumplir en los sistemas de abastecimiento públicos y privados durante el manejo del agua, así como, los procedimientos sanitarios para el muestreo y el proceso de colecta de muestras. Para el caso de cenotes se realizó conforme a la norma NMX-AA-014-1980 cuerpos receptores – muestreo, que establece los lineamientos generales y recomendaciones para el muestreo en cuerpos receptores de aguas superficiales, con el fin de determinar sus características físicas, químicas y bacteriológicas.

El muestreo fue realizado por personal del Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA) acreditado ante la Entidad Mexicana de Acreditación, A.C.

(EMA) con oficio No. AG-177-032/09, y aprobación por CONAGUA con número CNA-GCA-1928, en cumplimiento de los requisitos de la Norma NMX-EC-17025:2018, indicando esto que el laboratorio y su personal cumple tanto los requisitos de competencia técnica como los del sistema de Gestión de Calidad necesarios para entregar resultados de ensayos técnicamente válidos.

Los parámetros seleccionados para las muestras de agua en los 22 pozos fueron aniones (carbonatos, bicarbonatos, cloruros, fluoruros, fosfatos, nitritos y nitratos), cationes (calcio, magnesio, potasio, sodio y nitrógeno amoniacal), pH, temperatura, conductividad eléctrica y potencial redox. Con respecto a los cenotes, los parámetros analizados, así como, el tipo de contenedor usado y su preservación se presentan en la Tabla 4.

Tabla 4. Tipo de contenedor y preservación por parámetro para su análisis.

Parámetro	Tipo de contenedor	Volumen (mL.)	Preservación
Demanda Bioquímica de Oxígeno, Fósforo Total, Sólidos suspendidos totales.	Plástico	2000	Hielo a 4°C ± 2°C
Nitrógeno como Nitrógeno Total, Nitrógeno de nitratos, Nitrógeno de nitritos.	Plástico	2000	H ₂ SO ₄ a 4°C ± 2°C
Demanda Química de Oxígeno	Vidrio	110	H ₂ SO ₄ a 4°C ± 2°C
Grasas y Aceites	Vidrio	1000	HCl, 4°C ± 2°C
Color Verdadero (Método de Coeficientes de Absorción Espectral)	Vidrio ámbar	250	Hielo a 4°C ± 2°C
Coliformes fecales, Coliformes totales, Escherichia coli	Bolsas estériles	100	Hielo a 4°C ± 2°C

Equipo

Los equipos para la medición de parámetros de calidad del agua en campo se calibraron y verificaron previamente, conforme a las recomendaciones del fabricante y los procedimientos establecidos en el laboratorio. En cada uno de los sitios se verificó el funcionamiento del equipo, y se realizó calibración

en caso de ser necesario. Para la medición de los parámetros de campo se utilizó un equipo multiparamétrico con compensador de temperatura, sus características se describen en la Tabla 5. Para el caso de medición de parámetros de campo en pozos se utilizó una celda de aislamiento.

Tabla 5. Características del equipo multiparamétrico.

Analizador Pocket Pro+ Multi 2	Intervalo de medición	Precisión
	Temperatura (C°) -5 a 50	± 0,05 °C
	Conductividad (mS/cm) 0 a 200	± 0,5 %
	Salinidad (ppt) 0 a 70	± 1,0 %
	pH 0.00 – 14.00	±0.02
	Sólidos Disueltos Totales (SDT) (ppt) 0.0 a 10.00	±1

Enjuague de recipientes y material auxiliar de muestreo

Previo a la colecta de la muestra, los recipientes de muestreo y el material auxiliar de muestreo que se utiliza, se enjuagó de dos a tres veces con el agua a colectar, en los parámetros que aplica.

Conservación y preservación de las muestras

Durante la colecta de las muestras, conforme se fue llenando cada uno de los recipientes, estos se colocaron en la hielera, la cual previamente contiene hielo para conservar las muestras a una temperatura de $4\text{ °C} \pm 2\text{ °C}$. Una vez terminada la colecta de las muestras se procede a preservar aquellas que lo requieran. En aquellas muestras donde en la preservación se utilizan soluciones ácidas o básicas (ver Tabla 4), se verificó que la muestra hubiera alcanzado el pH indicado en la tabla.

Identificación y control de muestras

Para la identificación de las muestras, los contenedores fueron etiquetados con la fecha de muestreo, hora, nombre del muestreador, parámetro a analizar, preservación de la muestra e identificación de la misma (Figura 20).

Figura 20. Identificación y control de las muestras



Embalaje, transporte y almacenamiento de muestras

Para el envío de las muestras al laboratorio, estas fueron embaladas en las hieleras, de tal forma que se evite que los recipientes sufran ruptura o fugas que provoquen la pérdida de las muestras y/o su contaminación. Asimismo, las muestras contenidas en la hielera se acompañaron con geles para conservar a una temperatura entre $4\text{ °C} \pm 2\text{ °C}$ hasta su entrega.



Resultados e interpretación de las mediciones

Pozos

Se midieron los parámetros que se indican en la Tabla 6, donde se registra el promedio de cada uno, en los pozos seleccionados.

Tabla 6. Resumen de parámetros de campo en pozos de agua.

No.	Campo	pH	Conductividad Eléctrica ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	Oxígeno Disuelto (mg/L)	T ($^{\circ}\text{C}$)
1	POZO FRANBOYAN	8.2	1577.4	2.0	28.2
2	POZO CHIXULUB PUEBLO	7.1	1150.5	2.9	28.4
3	NORIA CONKAL	7.3	1125.6	7.4	27.5
4	SIERRA PASACAL POZO 2	7.1	2432.5	1.7	29.8
5	POZO SAN IGNACIO	7.0	3908.0	1.8	28.2
6	NORIA CHEUMAN	7.5	1709.5	5.2	27.8
7	POZO LE JAPAU	7.0	1166.5	5.0	27.4
8	POZO LA CENTRAL	7.2	1185.4	5.7	28.5
9	POZO ACUNCEH	7.1	1148.6	6.3	27.4
10	POZO CUZAMA	7.1	1142.4	7.7	28.8
11	POZO 1 HOCABA	7.0	1199.2	5.5	27.4
12	POZO OPICHEN	5.8	2990.0	6.6	28.2
13	POZO POXILA	7.0	1737.3	4.1	27.8
14	NORIA TZIBIKAK	7.0	968.8	3.2	27.7
15	POZO 1 TEXAN PALOMEQUE	6.9	1135.8	4.2	27.6
16	POZO HUNUCMA	7.0	1366.4	4.2	27.6
17	POZO GLORIETA KINCHIL	7.1	1813.8	4.7	27.8
18	POZO NOHUAYUN	7.1	1683.2	3.9	28.4
19	POZO SAN JOSE TZAL	7.0	1371.1	5.9	28.6
20	POZO PALACIO CACALCHEN	7.4	744.0	7.4	29.4
21	POZO MOTUL	7.0	1076.0	6.1	27.5
22	POZO SAN FRANCISCO	6.9	1265.6	4.9	27.4

Nota: Los valores en rojo superan el límite permisible para agua potable como sólidos disueltos totales (SDT), establecido en la NOM-SSA-127, 2021, en este caso se midió conductividad la que al multiplicarla por el factor de conversión de 0.71, se obtiene la concentración aproximada de SDT.

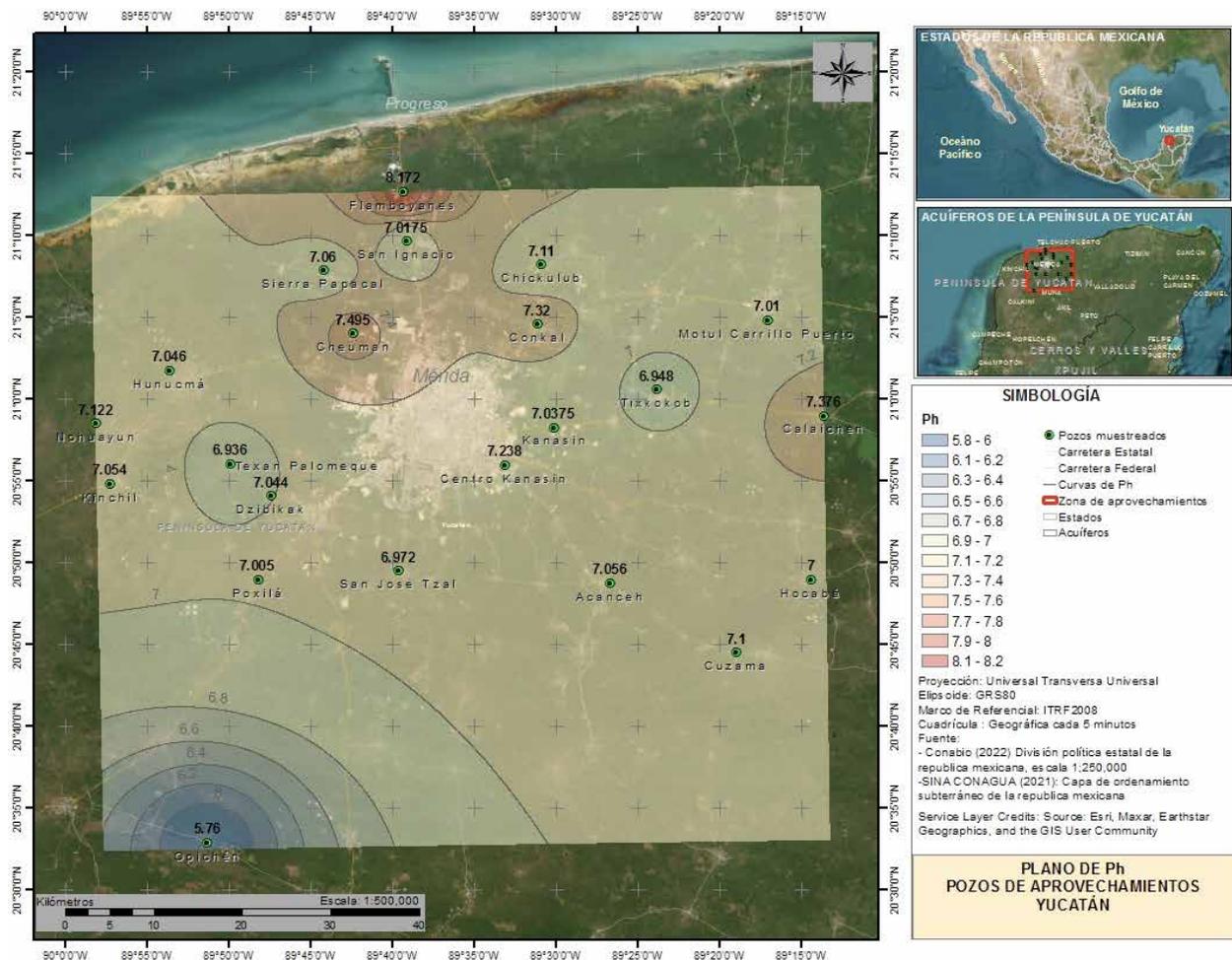


Potencial de hidrogeno (ph)

El pH bajo, indica una acidificación del medio. En el agua subterránea el pH tiende a ser balanceado, ya que es difícil encontrar minerales libres (Sawyer *et al.*, 2001). La figura 21 en el mapa de isolíneas (isograma), que representa bidimensionalmente una superficie estadística suavizada mediante

elementos lineales que unen puntos de valor constante, en él se aprecia la distribución espacial del pH. En los pozos analizados se obtuvieron valores que van desde 5.8 a 8.2 UpH, siendo el promedio de 7.1 UpH, estos valores se encuentran dentro del intervalo de aceptación.

Figura 21. Isograma de pH.

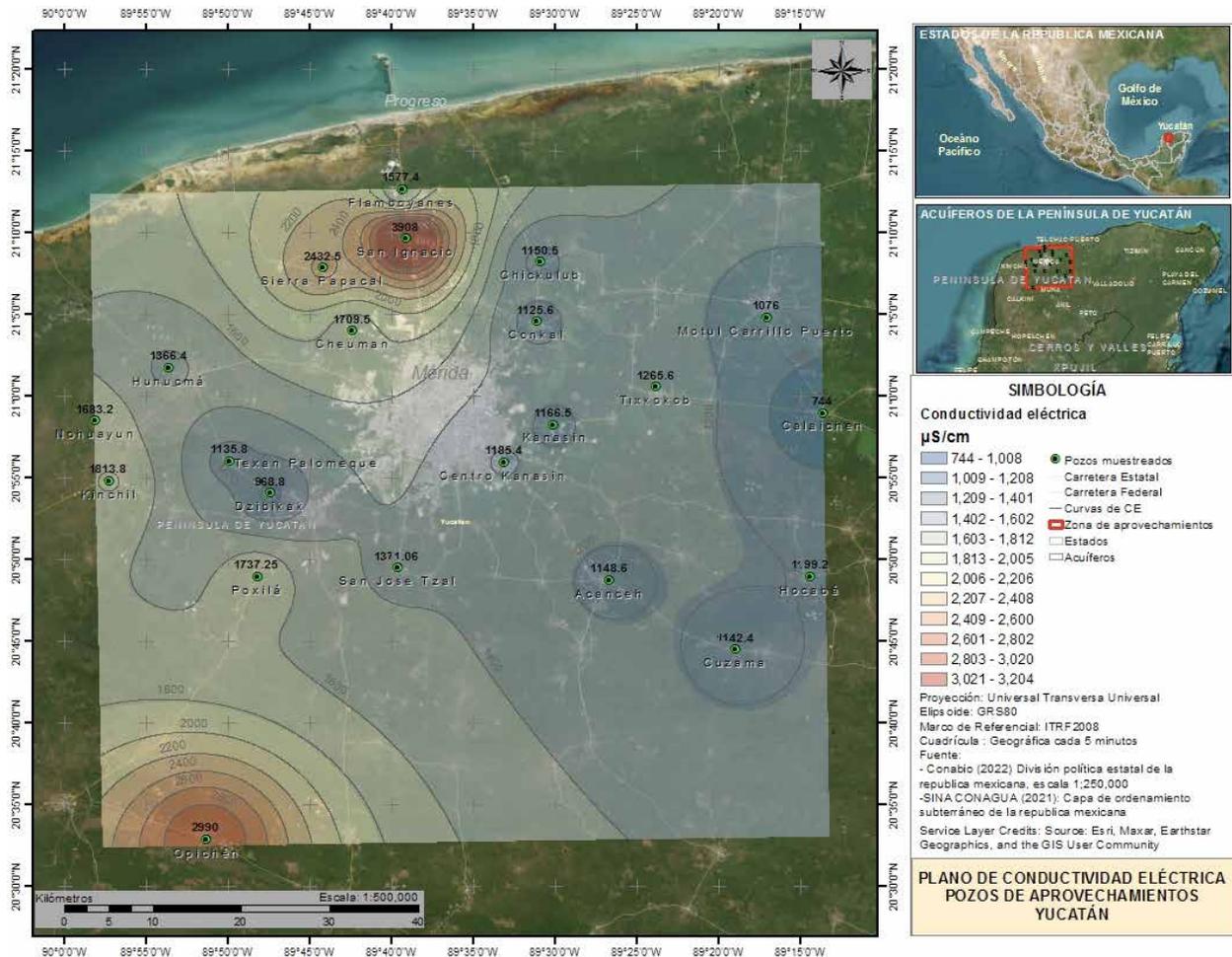


Conductividad Eléctrica (CE)

La conductividad eléctrica, es una medida de la cantidad de sales disueltas o de la actividad iónica de una solución, en términos de su capacidad para transmitir corriente, que varía en función de la temperatura y está estrechamente ligada a la naturaleza de las sustancias disueltas. Por lo anterior esta medida tiene una relación con la presencia de sólidos disueltos totales (Barrenechea, 2004). Los valores muestran entre 744 a 3,908 ($\mu\text{S}/\text{cm}$), que equivalen

a 531- 2,791 ppm. La Figura 22, presenta un mapa de isolíneas de la conductividad eléctrica, donde se aprecia que los valores más importantes se presentan al suroeste de Mérida y cerca de la costa, al norte de la misma, lo que indica la presencia de un alto contenido de sales disueltas en dichos sitios; por otra parte, cerca de Mérida y hacia el oriente de la ciudad los valores disminuyen considerablemente.

Figura 22. Isograma de conductividad eléctrica ($\mu\text{S}/\text{cm}$)



Oxígeno disuelto (OD)

Los niveles de oxígeno disuelto en aguas naturales y residuales dependen de la actividad física, química y bioquímica del sistema de agua. La solubilidad del oxígeno en el agua varía directamente con la presión atmosférica, a cualquier temperatura y con la presencia de sales y/o sólidos.

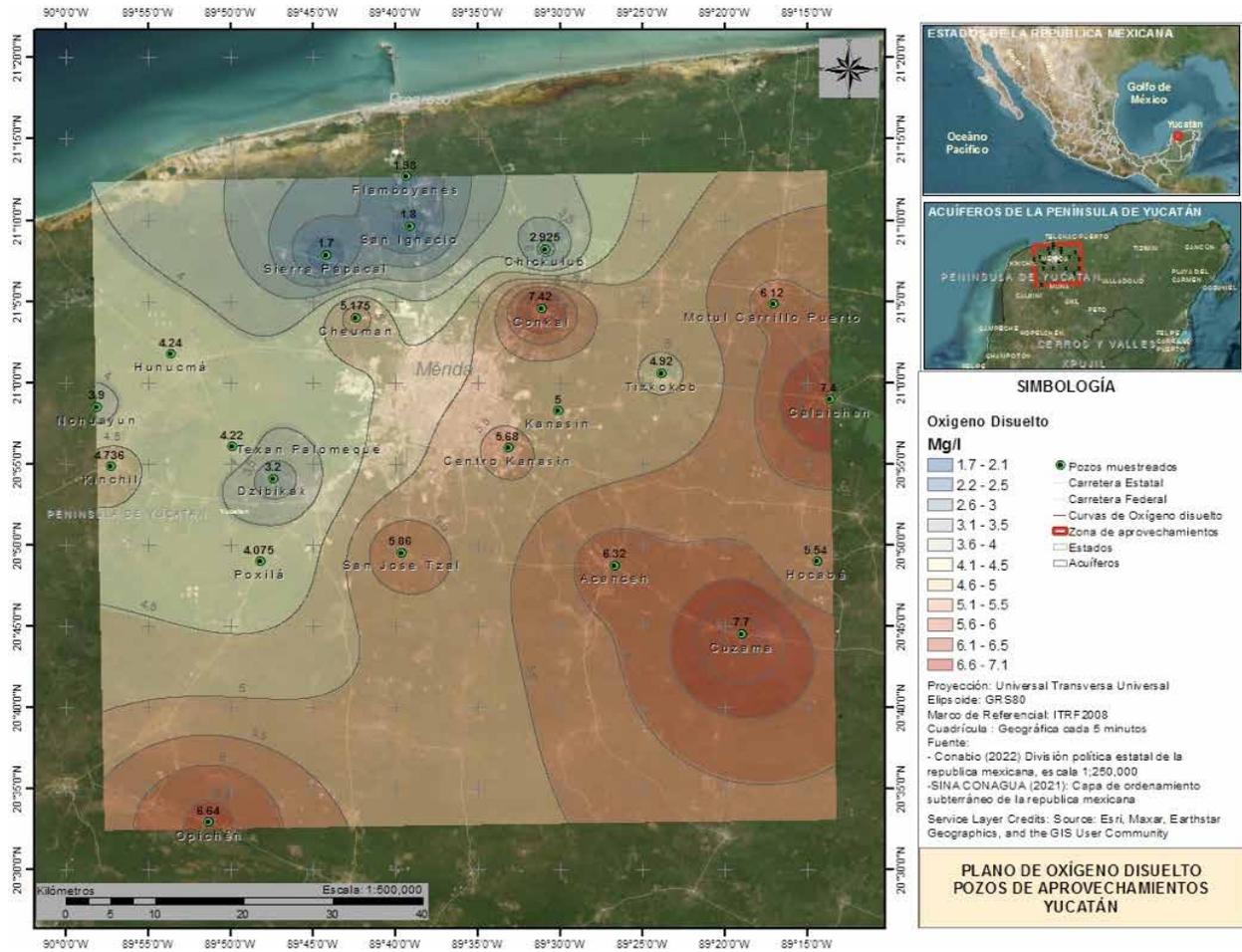
El oxígeno disuelto, en el agua, afecta, principalmente, las reacciones en las que participan el hierro, manganeso, cobre y los compuestos que contienen nitrógeno y azufre (Jiménez, 2001).

La solubilidad del oxígeno en agua dulce varía desde 14.6 mg/L a 0°C hasta aproximadamente 7 mg/L a 35°C a 1 atm de presión. Mientras que en aguas

que contienen sal la solubilidad del oxígeno es menor. Por otra parte, la profundidad es otro factor que determina la cantidad de oxígeno disuelto, mientras que en ríos y arroyos los cambios suelen estar más vinculados a la dimensión horizontal (Harris, 2003). La Figura 23 representa las isolíneas de oxígeno disuelto, donde se aprecia que los valores más altos de este parámetro se dan en la zona oriente, suroriente y sur de Mérida, mientras que los valores más bajos se concentran al norte de la ciudad, cercanos a la costa y al suroeste de la misma.



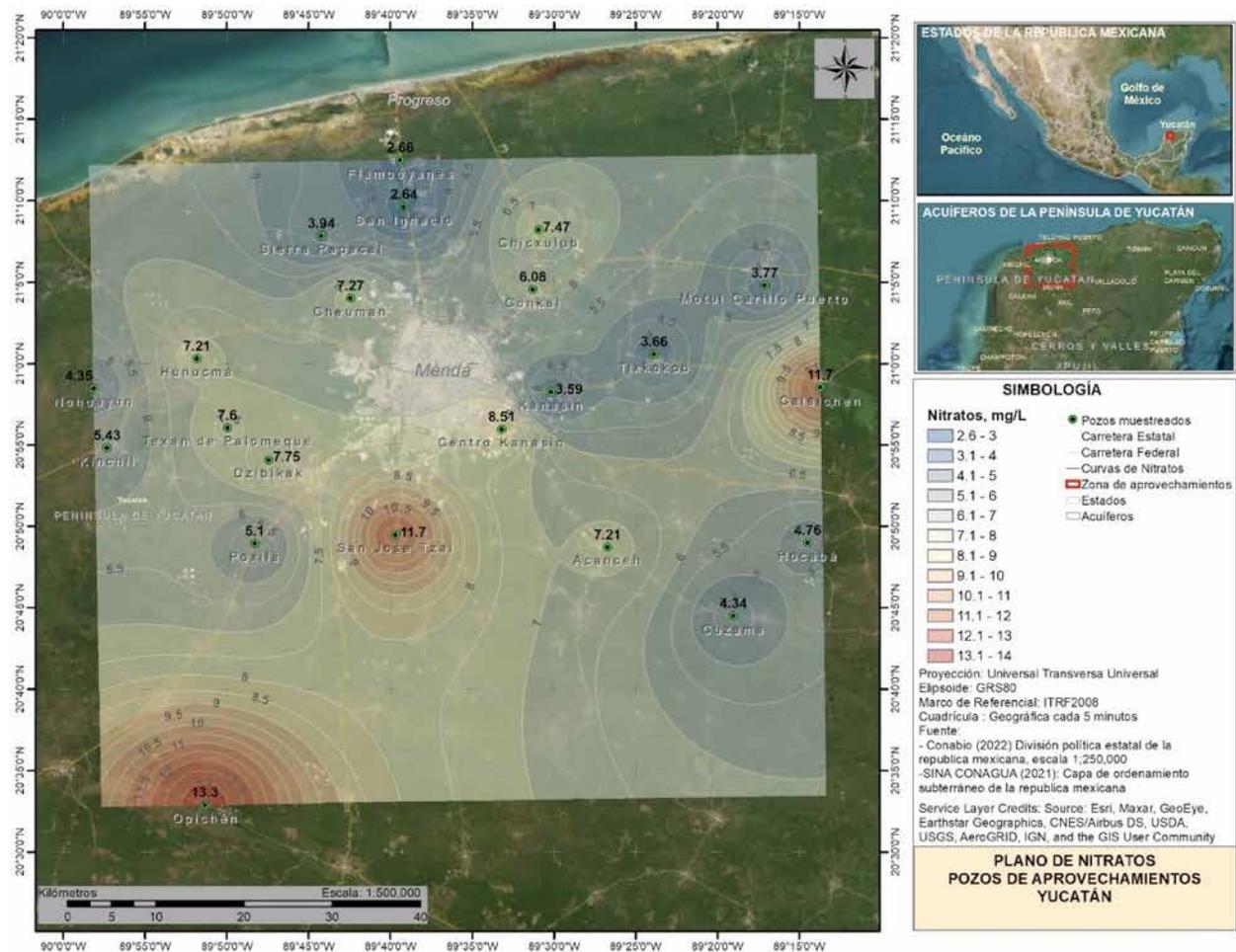
Figura 23. Isograma de concentración de oxígeno disuelto (mg/L).



Nitrógeno de Nitratos (NO_3)

Se encontraron valores que van de 2.6 a 14.0 mg/L en los pozos muestreados y estos valores están estratificados de manera espacial en el Estado de Yucatán, concentrándose en el suroeste de Mérida en dos sitios específicos, mientras que los valores más altos se presentan al norte y sureste de la capital de Yucatán (Figura 24).

Figura 24. Concentración de Nitratos (mg/L).



Cenotes

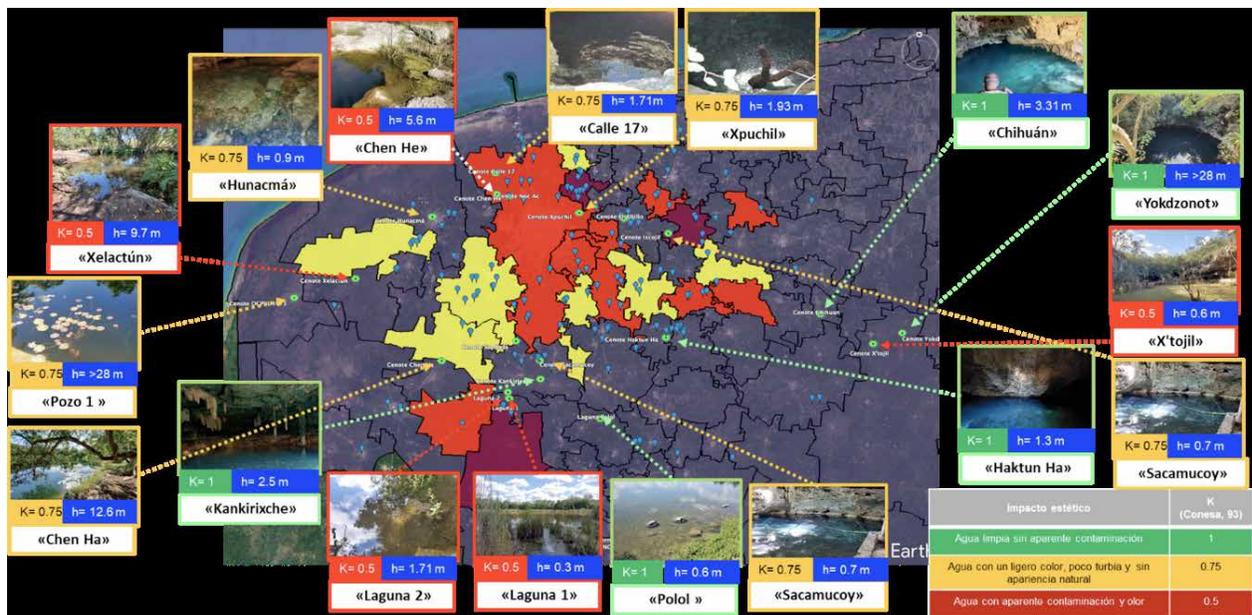
Coefficiente Cualitativo k

Para los cenotes seleccionados, se midieron diversos parámetros de campo *in situ* y se realizó una evaluación con el coeficiente cualitativo K, propuesto por Conesa (1993). La apreciación y designación del coeficiente cualitativo K (Figura 25), advierte que 12 cenotes de los 17 ubicados en zonas de actividad

pecuaria clasificados en esta figura, presentan un deterioro cualitativo de la calidad del agua:

- a) Agua con aparente contaminación y olor (K=0.5), Cinco cenotes.
- b) Agua con ligero color, poco turbia y sin apariencia natural (K=0.75) Siete cenotes.
- c) Agua limpia sin aparente contaminación (K=1.00), Cinco cenotes.

Figura 25. Evaluación del coeficiente cualitativo K (Conesa, 1993).



En la figura anterior se aprecia la influencia de los sitios con alta densidad de cerdos (morado y rojo) en la calidad cualitativa del agua de los cenotes, los valores más bajos del coeficiente K parecen estar estrechamente relacionados con la presencia de las granjas porcícolas (pines azules).

Adicionalmente al análisis anterior, se obtuvieron los siguientes parámetros de campo medidos *in situ*: la conductividad eléctrica, temperatura, salinidad y profundidad, cuyos valores promedio se resumen en el Anexo, para cada uno de los cenotes seleccionados.

De manera general se presentaron concentraciones bajas de materia orgánica e inorgánica al tener concentraciones bajas de Demanda Bioquímica de Oxígeno y Demanda Química de Oxígeno; las concentraciones de grasas y aceites, y de Sustancias Activas al Azul de Metileno (SAAM), fueron menores al límite de cuantificación del método; las tablas de

los resultados correspondientes pueden ser consultadas en el Anexo.

Asimismo, se obtuvieron valores por debajo del límite de cuantificación de nitrógeno de Nitritos, sin embargo, se encontraron concentraciones de Nitrógeno amoniacal, Fósforo total y *E. Coli* por arriba de los límites permisibles en los lineamientos de Calidad del Agua para protección a la vida acuática, así como nitratos por arriba de la NOM-127-SSA1-2021, Agua para uso y consumo humano. Límites permisibles de la calidad del agua.

Estos parámetros de calidad del agua fueron analizados de manera espacial por zonas: sur, este y noroeste, respectivamente de acuerdo a la dirección del flujo subterráneo. De la misma manera, se identificaron cenotes ubicados en una zona de referencia, libre de la interferencia de actividades urbanas y pecuarias (Figura 26).

Figura 26. Análisis espacial por zona.



Nitrógeno amoniacal (NH_3)

El nitrógeno durante su travesía por el ciclo bioquímico en el agua, pasa por diversas especies químicas y en la práctica común se mide en cada una de sus formas para sumarlo. Esto permite tener una caracterización del estado del sistema acuático en el cual el nitrógeno fue analizado.

La primera especie química del nitrógeno presente, cuando se descarga un agua residual cruda o desechos orgánicos sólidos, es el nitrógeno orgánico que está asociado a moléculas orgánicas como las proteínas, los ácidos nucleicos o metabolitos finales como la urea y el ácido úrico; como materia orgánica está sujeta al consumo por parte de microorganismos, los cuales lo procesan y transforman el nitrógeno presente en amoníaco, al cual denominamos nitrógeno amoniacal.

El nitrógeno amoniacal permanece disuelto en el agua como ion amonio a pH ácido y se transforma en gas amoníaco a pH alcalino, el cual, es susceptible de volatilizarse al ambiente. El gas amoníaco es irritante y potencialmente mortal en concentraciones elevadas para la vida acuática; sin embargo, los procesos biológicos lo metabolizan o asimilan antes que se acumule.

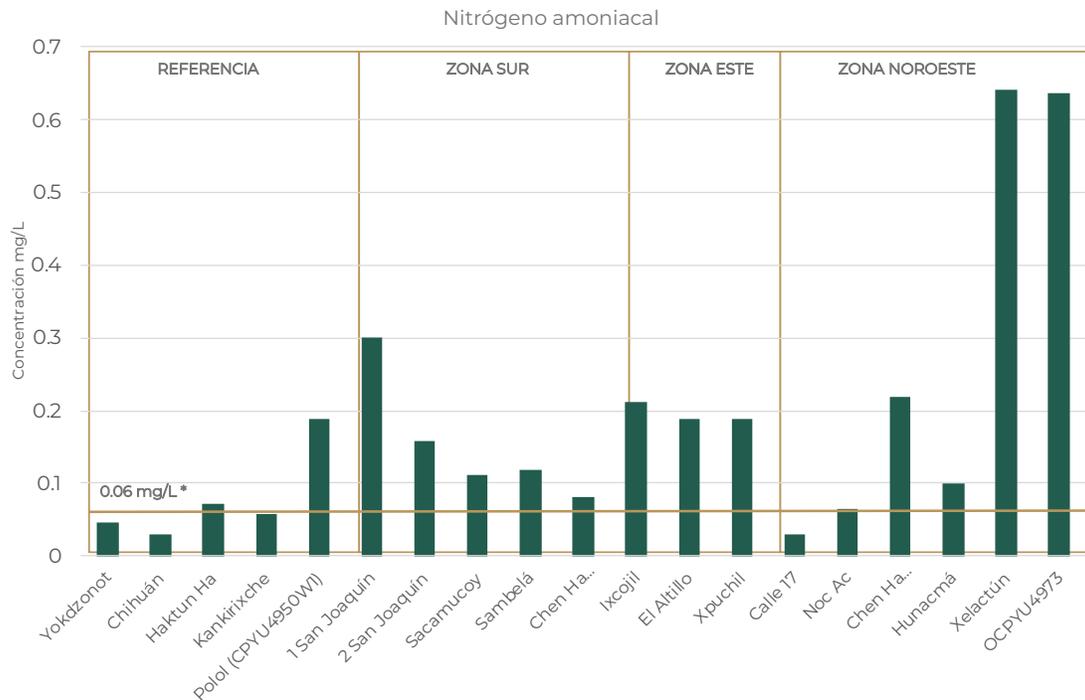
En la Figura 27 se presentan los valores de nitrógeno amoniacal (NH_3) de los cenotes muestreados y

se realiza una comparación con los Lineamientos de Calidad del Agua (Ley Federal de Derechos 2022).

Como resultado de la oxidación biológica del nitrógeno amoniacal (nitrificación), llevado por bacterias nitrosomonas de lento crecimiento y metabolismo generan los nitritos. Cuando hay un desbalance o alteración de un ecosistema que afecte a estas bacterias ocasiona un incremento en la concentración del nitrógeno amoniacal. El nitrito es una especie química cuya toxicidad aguda es incluso mayor que la del amoníaco, pero no se volatiliza y se oxida rápidamente a nitrato por acción microbiológica.

En la siguiente figura se aprecia, tal como era esperado, que los valores en la zona de referencia son bajos, no obstante los más altos se localizan en la zona este y noroeste cuyas ubicaciones coinciden, con los municipios con altas densidades de granjas porcícolas.

Figura 27. Concentración de Nitrógeno Amoniaco en Cenotes.



*Lineamientos de Calidad del Agua. (Protección a la vida acuática: Agua dulce, incluye humedales).

Además del análisis general de los valores de nitrógeno amoniaco de los cenotes y debido a que es sumamente complejo desagregar la influencia que tiene la zona urbana en la calidad del agua subterránea, se realizó un análisis espacial estratificado en la zona sur (Figura 28) y zona este de la ciudad de Mérida (Figura 29), considerando la dirección del flujo subterráneo del agua. Para lo anterior, se ubicaron cenotes que estuvieran aguas arriba y aguas abajo de una granja, lo que permite apreciar el efecto específico de ésta en la calidad del agua sin la influencia de la urbanización. Los resultados obtenidos se muestran a continuación.

En general, se registraron valores de nitrógeno amoniaco mayores a los límites permisibles en los LCA, para la protección a la vida acuática: agua dulce, incluyendo humedales (0.06 mg/L). Mientras que el análisis estratificado de la zona sur de la ciudad de Mérida, indica una contaminación creciente de los cenotes Kankirixche, Sacamucoy y Sambelá (en ese orden), por Nitrógeno amoniaco, siguiendo la dirección del flujo subterráneo previo a la zona urbana de Mérida, ver Figura 28.

En este mismo sentido el análisis estratificado de la zona este, los cenotes Haktun Ha, Ixcojil, El Altillo y Xpuchil, presentan el mismo patrón de

comportamiento con la dirección del flujo subterráneo, previo al contacto con la zona urbana de la ciudad; lo que descarta la fuente de contaminación difusa de nitrógeno amoniaco por descargas de aguas residuales urbanas o domésticas, es decir, es evidente la contaminación por el efecto de las granjas porcícolas.

Nitratos (NO₃)

Finalmente, el nitrato es la forma más oxidada del nitrógeno y es el menos tóxico de las especies, por lo que puede acumularse y descargarse más fácilmente sin alterar los ecosistemas o la salud pública.

El nitrato es asimilado por plantas y algas, que pueden tomar tanto amoniaco como nitrato del ambiente y de manera que ingresa nuevamente a la cadena trófica o puede que sea transformado nuevamente en gas nitrógeno que regresa a la atmósfera: las bacterias llamadas desnitrificantes pueden reducirlo a nitrito y luego metabolizarlo a gas nitrógeno, aunque para ello requieren condiciones anaerobias.

En la Figura 30, observamos las concentraciones de nitratos en los diferentes cenotes muestreados.



Figura 28. Análisis espacial estratificado del Nitrógeno Amoniacal (NH₃). Zona Sur de la Ciudad de Mérida

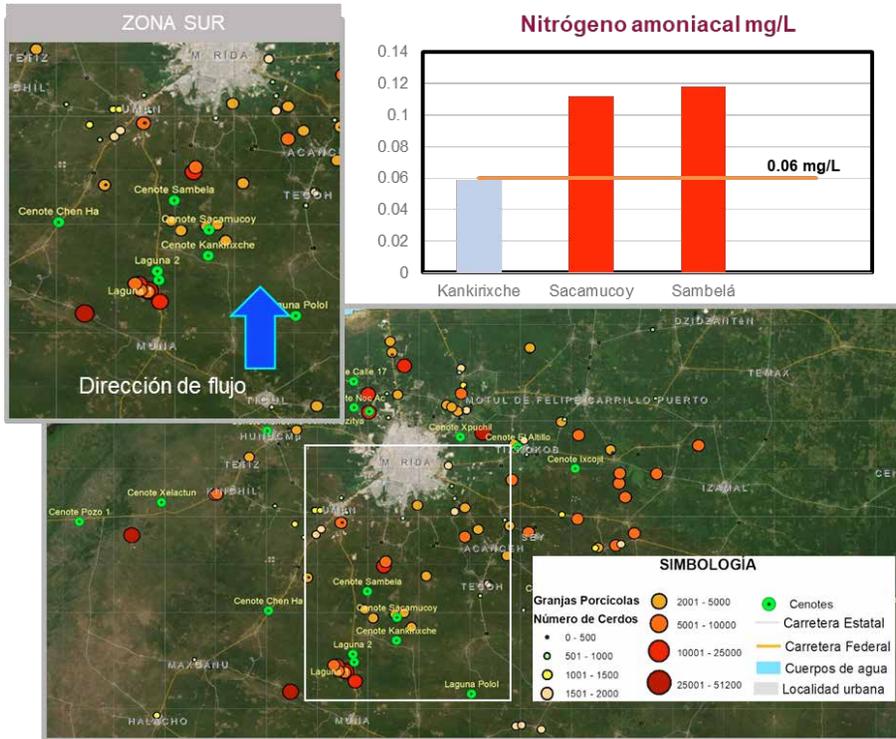


Figura 29. Análisis espacial estratificado del Nitrógeno Amoniacal (NH₃). Zona Este de la Ciudad de Mérida.

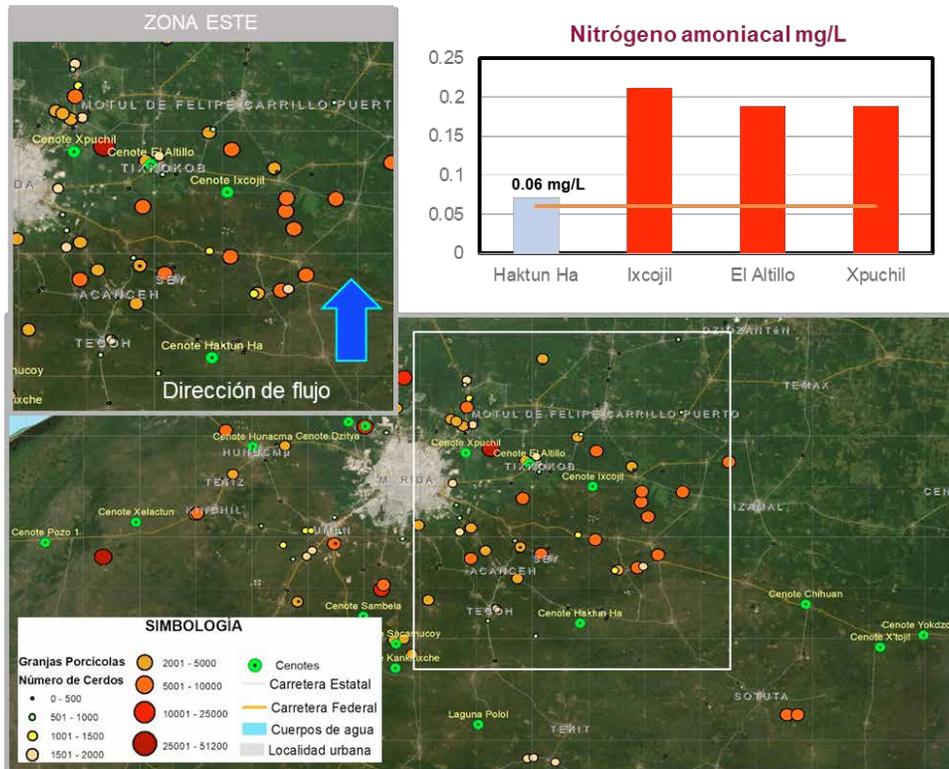
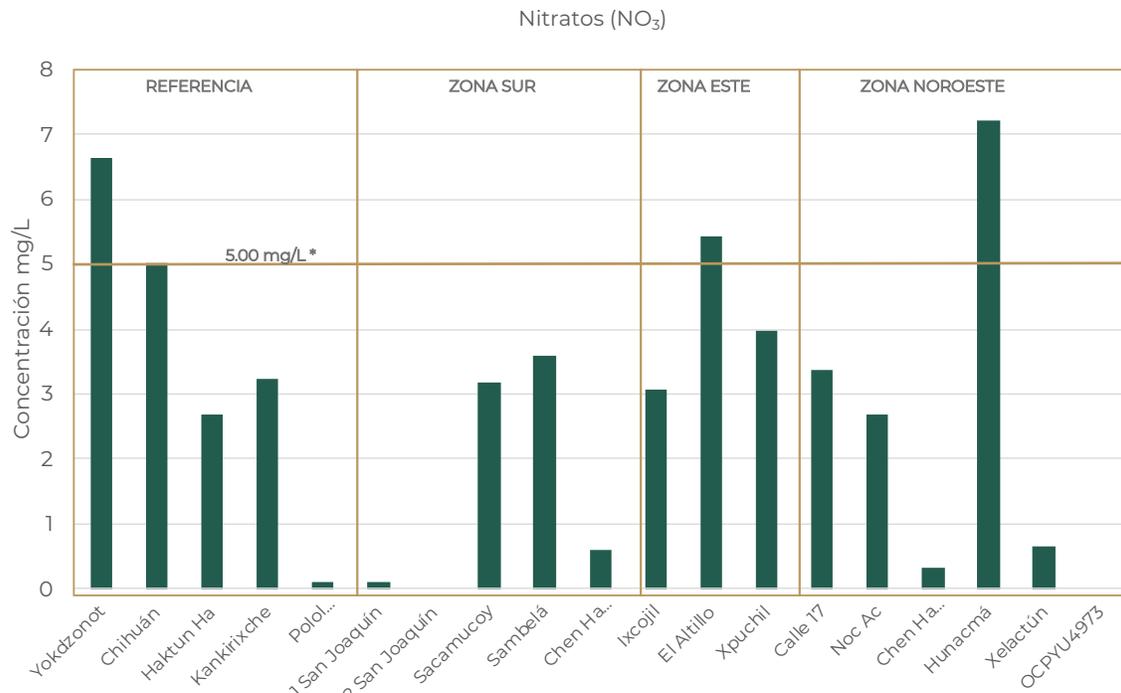


Figura 30. Concentración de Nitratos en Cenotes.



**Lineamientos de Calidad del Agua (Fuente de abastecimiento para uso público urbano).

El Nitrógeno de nitratos presentó concentraciones mayores al límite permisible (5.0 mg/L) de los lineamientos de calidad del agua para Fuente de abastecimiento para uso público urbano en los cenotes Hunacmá, El Altillo, Yokdzonot y Chihuahán, el cual limita su aprovechamiento para este tipo de uso.

Las concentraciones de Nitratos fueron mayores en los pozos que los cenotes analizados, esto derivado de que en cenotes con vegetación hidrófila y riparia, los nitratos son asimilados e ingresados nuevamente a la cadena trófica. En este caso no se aprecia una zona predominante en cuanto a valores altos de los Nitratos a diferencia del Nitrógeno Amoniacal.

Fósforo total (Pt)

Entre las fuentes de fósforo de origen natural se encuentran los depósitos y rocas fosfóricas las cuales desprenden fósforo, en forma de ortofosfato principalmente, mediante erosión. Las fuentes antropogénicas puntuales incluyen las aguas residuales domésticas e industriales; las fuentes no puntuales están asociadas con la escorrentía de áreas agrícolas y domésticas. Una fracción del P en los fertilizantes orgánicos e inorgánicos es removida parcialmente por las plantas, otra fracción es arrastrada por el agua y el resto se acumula en el suelo trayendo

como consecuencia la presencia de cantidades elevadas de este elemento en ríos y lagos.

La concentración de Pt varía en el tiempo (estiaje y lluvias) y en espacio, reportando concentraciones más altas en zonas industriales y agrícolas.

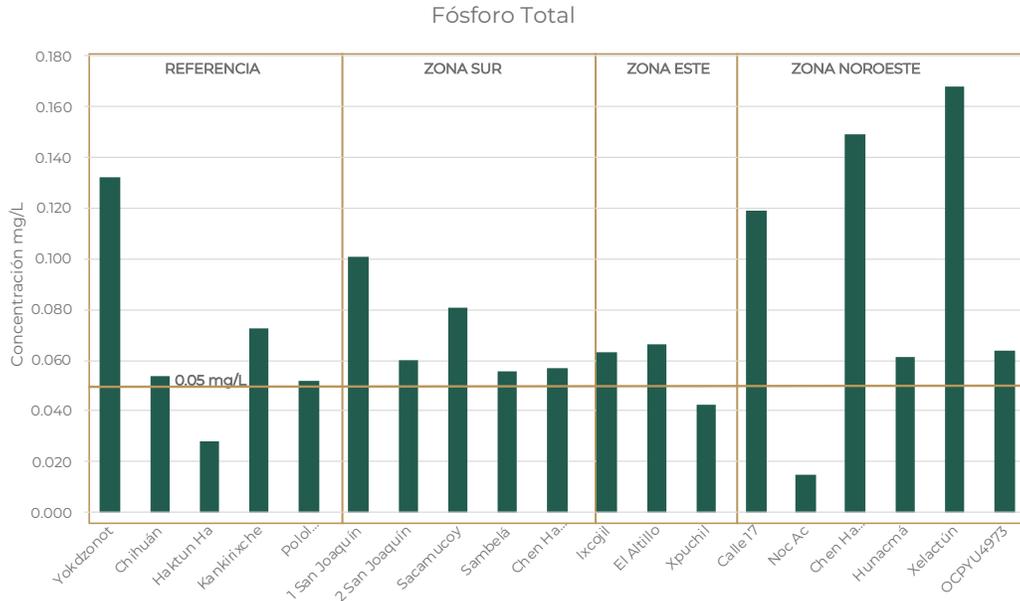
Para el caso de los cenotes, el fósforo total presentó concentraciones mayores al límite permisible (0.05 mg/L) para la protección a la vida acuática, en todos los cenotes, acentuándose el efecto en la zona sur, este y noroeste, coincidiendo una vez más con la ubicación de los municipios con las mayores densidades de cerdos, con excepción de los cenotes Haktun Ha, Xpuchil y Noc Ac.

Escherichia coli (E.coli)

En todos los cenotes muestreados se superaron los valores de Coliformes fecales (E. Coli y Enterococos Fecales) de los lineamientos de Calidad del Agua para la protección a la vida acuática: agua dulce, incluyendo humedales, esto es un indicativo de contaminación por aguas residuales domésticas y actividades pecuarias ya que estos organismos patógenos son indicativos de contaminación puntual y difusa de excretas de seres vivos de sangre caliente.



Figura 31. Concentración de fósforo total en Cenotes.

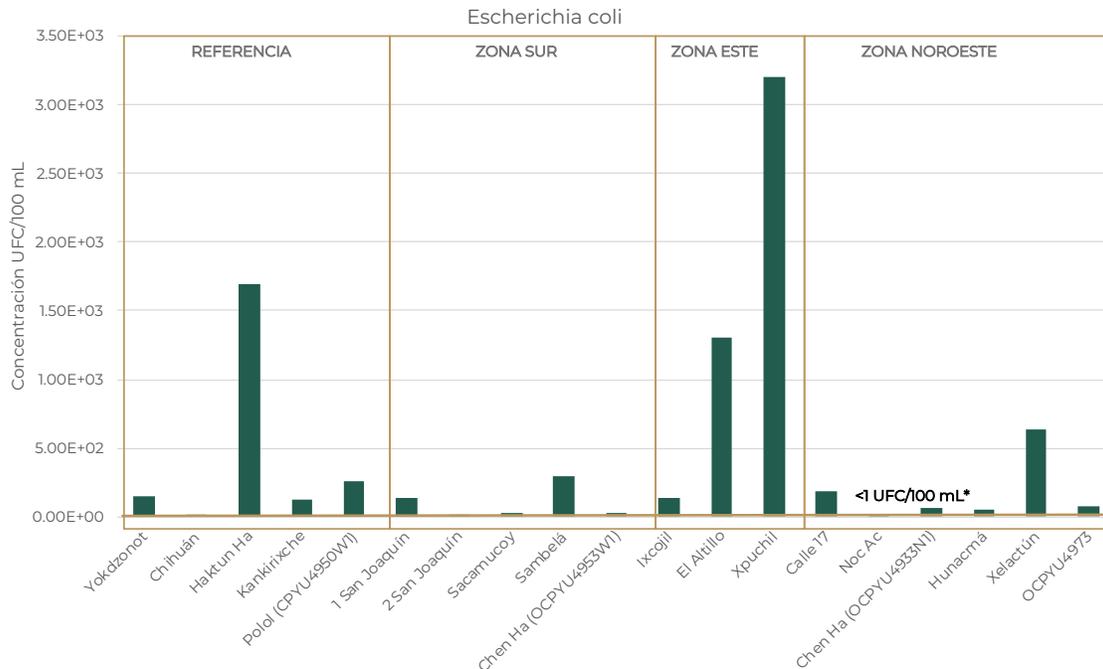


*Lineamientos de Calidad del Agua. (Protección a la vida acuática: Agua dulce, incluye humedales).

La presencia de *Escherichia coli* (Figura 32), indica contaminación fecal en agua, este microorganismo es habitante normal del tracto digestivo de animales de sangre caliente y se encuentra en agua o suelo que haya sufrido algún

tipo de contaminación fecal, por ello se considera como indicador universal. El efecto se aprecia en mayor medida en la zona este y en la de referencia, no obstante en toda el área de estudio se superan los límites permisibles.

Figura 32. Concentración de E. Coli en cenotes.



*NOM-127-SSA1-2021, Agua para uso y consumo humano. Límites permisibles de la calidad del agua.





5.2 Diagnóstico de Aguas Residuales de Granjas Porcícolas

Objetivo de la medición

Verificar si los efluentes de los sistemas de tratamiento de aguas residuales de las granjas porcícolas satisfacen los límites permisibles (LP) de contaminantes indicados en la NOM-001-SEMARNAT-2021 para suelos cársticos.

Descripción de la muestra

En conjunto con la Secretaría de Desarrollo Sustentable de Yucatán, SEMARNAT y sector porcícola del estado, se estableció contacto con diez granjas porcícolas (dedicadas, ya sea a la cría, destete, engorda o al ciclo completo), que cuentan con permiso de descarga de las aguas residuales y sistemas de tratamiento instalados y en funcionamiento y que estuviesen dispuestas a la toma de muestras de agua de sus sistemas de tratamiento.

Asimismo, se buscó que las granjas elegidas comprendieran la mayor dispersión espacial posible y que algunas estuvieran cercanas a sitios de vulnerabilidad ambiental como la REGAC, o bien sitios Ramsar, y que otras estuvieran más alejadas de zonas vulnerables. Dado que fue un ejercicio voluntario por parte de las granjas participantes, no fue del todo posible aplicar rigurosamente los criterios de selección originalmente acordados.

En la Tabla 7 se presenta el listado de las granjas que aceptaron participar en esta iniciativa, en la tabla se incluye el tipo de granja, el volumen de descarga, si cuentan con reúso distinto al riego forestal o agrícola, el número de sistemas de tratamiento en la granja o complejo y la fecha de toma de muestras.

Tabla 7. Granjas en las que se muestrearon los sistemas de tratamiento de aguas

Identificación	Tipo de granja	Número de cabezas	Volumen de descarga (m ³ /d)	Reúso distinto del riego (m ³ /d)	Número de sistemas de tratamiento	Fecha del muestreo
Granja 1	2 Destete	48 000	386	0	1	4/10/2022
Granja 2	2 Destete	13 984	150	0	2	4/10/2022
Granja 3	3 Engorda	13 700	123	70-90	1	5/10/2022
Granja 4	3 Engorda	6 912	123	0	1	5/10/2022
Granja 5	1 Maternidad	39 000	856	459	3	6/10/2022
Granja 6	3 Engorda	101 568	1223	0	2	6/10/2022
Granja 7	3 Engorda	8 000	144	0	1	7/10/2022
Granja 8	1,2,3 Ciclo completo	48 640	781	417	2	7/10/2022
Granja 9	3 Engorda	12 000	146	0	1	10/10/2022
Granja 10	3 Engorda	10 000	98	0	1	10/10/2022

Los detalles de la información recopilada de cada granja tales como volúmenes de extracción, características específicas de los sistemas de tratamiento, aprovechamiento del biogás (cuando lo hay) o la quema del mismo, uso específico del agua tratada (cuando se hace) se muestran en el Anexo .





Metodología

En cada granja se llevó a cabo un recorrido por el sistema de tratamiento de aguas residuales. El recorrido fue guiado por personal del área ambiental y personal de la granja visitada. Se aplicó un cuestionario para obtener información de la granja y del sistema de tratamiento. Durante el recorrido se tomaron muestras en 4 puntos del sistema de tratamiento:

1. Cárcamo de bombeo (agua cruda);
2. Efluente del biodigestor anaerobio;
3. Efluente de la laguna de estabilización (o del sistema lagunar) y;
4. Salida de la unidad de desinfección del agua (efluente final o descarga).

Los sistemas de tratamiento de aguas residuales de las diez granjas participantes se apegan, aunque con pequeñas variantes, a esta secuencia de tratamiento. En algunas granjas incorporan unidades de proceso para la separación de sólidos suspendidos, ya sea mecanizados (tambores o mallas rotativas) o hidráulicos (tanques de separación de sólidos), pero todas las instalaciones de tratamiento visitadas cuentan con las cuatro etapas de tratamiento consideradas para la toma de muestras.

Las muestras de aguas residuales fueron puntuales, no compuestas. Sin embargo, se considera que son representativas ya que, por un lado; todos los sistemas reciben las aguas residuales por pulsos, es decir, el flujo ocurre cuando hay lavado (flusheo) de las excretas, y no es un flujo sostenido a lo largo del día. Y por otro lado, cada uno de los cárcamos tiene suficiente capacidad de almacenamiento para contener los lavados (flusheos) de alrededor de 24 horas de operación de la granja, y por lo mismo funcionan también como un tanque de homogenización.

En cada uno de los puntos muestreados se analizaron los siguientes parámetros de la NOM-001-SEMARNAT-2021: temperatura, pH, Sólidos Suspendidos Totales, Grasas y Aceites, DQO, Nitrógeno Total, Fósforo Total, Color verdadero (método de coeficientes de absorción espectral), Toxicidad, E. coli y huevos de helminto.

La toma de muestras estuvo a cargo de muestreadores acreditados ante la Entidad Mexicana de Acreditación (EMA) y el muestreo se llevó a cabo con base en la NMX-AA-003-1980 Aguas Residuales. - Muestreo.

Las muestras se preservaron de acuerdo con las Normas Mexicanas (NMX) de Análisis de Agua respectivas. En la tabla 8 se resumen las principales directrices para preservación y transporte de las muestras por parámetro a analizar. Una vez preservadas, las muestras fueron enviadas para su procesamiento en el laboratorio de Calidad del Agua acreditado del IMTA.





Tabla 8. Directrices para preservación y transporte de las muestras.

Parámetro	Volumen mínimo requerido (mL)	Recipiente	Preservación
Color Verdadero - Método de Coeficientes de Absorción Espectral	150	Vidrio ámbar	4°C
Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO)	200	P, V	4°C
Demanda Química De Oxígeno (DQO)	1000	P, V	2 -8 °C, H ₂ SO ₄ pH<2, protegido de la luz
Fósforo Total	500	P	4°C
Grasas Y Aceites	800-1000	V Boca ancha	Solución 1:1 de HCl pH<2, 4°C
Nitrógeno Total	300	P, V	H ₂ SO ₄ pH<2, 4°C
Sólidos Suspendidos Totales, Volátiles y Fijos	500	P, V	4°C ± 2°C
Coliformes totales, fecales y <i>Escherichia coli</i>	300	P, V Esterilizados Preferente: 2 Bolsas Whirl-Pak estériles, nuevas, por muestra	4°C Tiosulfato de sodio (cuando la muestra presenta cloro)
Huevos de helminto	5000	P (Paredes lisas)	4°C
Toxicidad aguda con <i>Vibrio fischeri</i>	500 a 1000	Frascos nuevos y lavados de vidrio ámbar de borosilicato, boca angosta con capacidad de 500 a 1000mL y contratapa de teflón o poner papel aluminio. Tapa de polipropileno de alta densidad o baquelita.	4°C ± 2°C





Resultados de las mediciones

Conformación de los sistemas

En general los sistemas de tratamiento de aguas residuales en las granjas porcinas están conformados por el cárcamo de bombeo en que se reciben todas las aguas del lavado de las celdas, por uno o más biodigestores con tiempos de retención alrededor de 30 días, una laguna facultativa o un sistema lagunar de las mismas características y un sistema de desinfección, ya sea que se cuente con un tanque de contacto diseñado ex profeso, o bien que el desinfectante se dosifique en la última sección de la laguna o del sistema lagunar.

En varios casos se observó que la laguna facultativa presenta azolvamiento, lo que reduce el tiempo de retención hidráulico en el sistema y va en detrimento de la calidad del efluente. Asimismo, se observó que, en algunas lagunas, la geometría de las mismas favorece la ocurrencia de cortos circuitos hidráulicos por lo que habría que incluir mamparas para asegurar un flujo pistón y minimizar los cortos circuitos en las lagunas.

Resultados analíticos

Los resultados completos obtenidos en los muestreos de los sistemas de tratamiento de aguas residuales de las 10 granjas se presentan en el Anexo, ahí se plasman los valores medidos en los cuatro puntos muestreados en cada una de las granjas visitadas.

En la Tabla 9 se muestra la eficiencia global de los sistemas de tratamiento de aguas residuales de cada una de las granjas en la remoción de los contaminantes analizados. Es decir, se comparan las concentraciones del agua cruda con las del agua ya tratada y que va a disposición final. En la Tabla 10 y en la Tabla 11 se presentan las concentraciones medidas en los efluentes de los sistemas de tratamiento de los principales parámetros de NOM-001-SEMARNAT-2021, así como los límites permisibles.

Asimismo, para la DQO se determinó el parámetro en forma total y su fracción soluble, de tal manera que se diferencie entre la fracción de demanda de

oxígeno que corresponde a materia en suspensión y la que corresponde a la materia disuelta. En la Tabla 11 se muestran los resultados de DQO total, DQO soluble y el diferencial entre ambos que corresponde a la fracción suspendida. Resulta evidente que la DQO soluble es mucho mayor que los Límites Permisibles (LP) de la NOM-001-SEMARNAT-2021, al igual que la fracción suspendida. Esto es importante, porque de optarse por algún sistema físico-químico (coagulación-floculación) este actuará principalmente sobre la fracción suspendida y en consecuencia, el resultado final no será suficiente para satisfacer la NOM-001-SEMARNAT-2021 ya que la fracción soluble, sobre la que hay poca eficiencia de remoción de los procesos de coagulación floculación, seguirá siendo mayor que los LP.





Tabla 9. Eficiencia de remoción de los sistemas de tratamiento de aguas residuales en las granjas porcinas

Identificación	Color (nm)			DBO ₅ (%)	DQO (%)	PT (%)	C y A (%)	NT (%)	SST (%)	Tox (%)
	435 (%)	525 (%)	620 (%)							
Granja 1	7.1	60.5	64.7	99.0	96.9	90.9	96.3	58.0	93.4	96.0
Granja 2	43.0	51.0	59.5	97.0	86.6	64.0	87.8	20.5	86.1	95.2
Granja 3	-20.3	-27.2	-35.6	99.5	91.9	85.9	93.7	-7.5	97.1	99.4
Granja 4	52.4	54.4	58.5	99.1	97.1	88.1	94.8	70.3	95.1	94.6
Granja 5	62.0	50.6	42.0	98.2	88.0	52.2	86.7	43.8	54.5	94.4
Granja 6	57.9	69.2	78.9	99.0	95.6	85.8	90.1	41.8	79.0	61.6
Granja 7	-26.7	-31.1	-20.9	99.2	91.9	94.3	95.9	33.6	86.4	98.8
Granja 8	26.9	30.1	41.1	95.6	91.9	77.4	87.7	-7.8	65.3	92.2
Granja 9	45.8	36.0	31.0	97.7	85.0	73.2	76.2	55.1	75.3	97.4
Granja 10	7.2	0.9	-9.5	96.7	88.4	86.7	91.7	62.8	94.4	98.0

Tabla 10. Características de los efluentes de los sistemas de tratamiento de las granjas porcícolas.

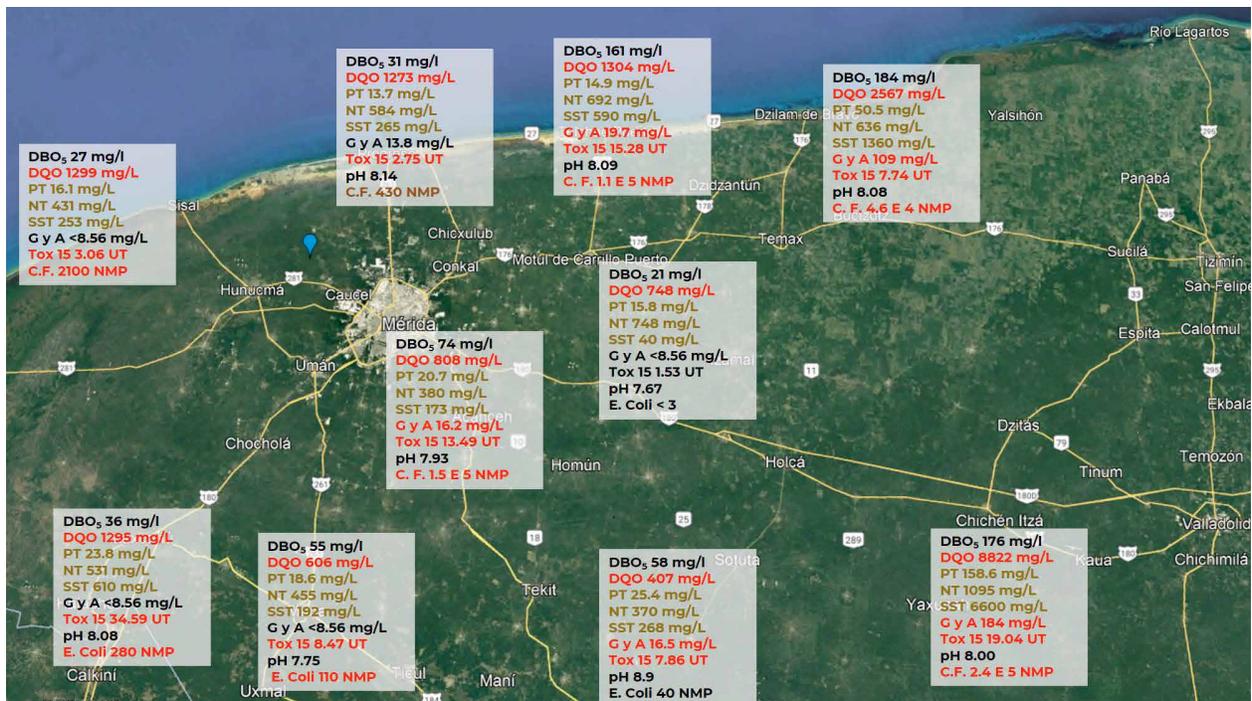
Granja	Temp (°C)	pH	Color (nm)			DBO ₅ (mg/L)	DQO (mg/L)	PT (mg/L)	C y A (mg/L)	NT (mg/L)	SST (mg/L)	Tox (UT)
			435	525	620							
Granja 1	32.0	8.9	16.1	5.1	1.8	58	407	25.4	16.5	370	268	7.8
Granja 2	33.4	7.75	15.8	4.9	1.7	55	606	18.6	<8.56	455	192	8.2
Granja 3	37.5	7.67	55.2	22.9	9.9	21	748	15.8	<8.56	748	40	1.5
Granja 4	33.5	7.93	36.6	13.1	5.1	74	808	20.7	16.2	380	173	13.5
Granja 5	33.3	8.00	61.7	28.7	13.1	176	8622	158.6	184	1095	6600	19.0
Granja 6	33.8	8.04	41.6	16.0	6.6	36	1295	23.8	<8.56	531	610	34.6
Granja 7	31.6	8.14	68.3	33.7	16.8	31	1273	13.7	13.8*	584	265	2.8
Granja 8	30.8	8.09	59.0	29.2	13.5	161	1304	14.9	19.7	692	590	15.3
Granja 9	29.4	8.08	53.1	26.1	12.0	184	2567	50.5	109	636	1360	7.4
Granja 10	SD	SD	68.7	33.7	16.1	27	1299	16.8	<8.56	431	253	3.1
L.P. suelo Cárstico	35	6 - 9	7.0	5.0	3.0	N.A.	60	5.0	15	15	20	2.0



Tabla 11. DQO total, soluble y diferencial (DQO suspendida)

Granja	DQO T (mg/L)	DQO S (mg/L)	Δ DQO (mg/L)
Granja 1	407	301	106
Granja 2	606	266	340
Granja 3	748	381	367
Granja 4	808	367	441
Granja 5	8622	502	8120
Granja 6	1295	435	860
Granja 7	1273	440	833
Granja 8	1304	453	851
Granja 9	2567	458	2109
Granja 10	1299	768	531

Figura 33. Ubicación de las granjas porcícolas muestreadas y concentraciones en los efluentes.



Nota: En la Figura 33 se muestra la ubicación espacial de las granjas y los principales resultados obtenidos. En los recuadros se utilizaron tres colores, negro, para indicar aquellos valores que están en cumplimiento de los límites permisibles (LP) ya sean de la NOM-001-SEMARNAT-1996 o de la NOM-001-SEMARNAT-2021; rojo para señalar aquellos valores que no cumplen con los LP de ninguna de las dos normas (1996 o 2021) y en color oro aquellos parámetros que no eran exigibles para la NOM-001-SEMARNAT-2021 por el tipo de permiso de descarga con que cuentan las granjas, pero que en la versión 2021 son exigibles y no cumplen con los LP.



Interpretación

Cabe aclarar que los sistemas de tratamiento de las granjas fueron diseñados para cumplir con la condición de descargas para uso en riego agrícola (aplicación en suelo) de la NOM-001-SEMARNAT-1996. Para ese tipo de descargas el énfasis del tratamiento se daba en el control de grasas y aceites, de microorganismos (Coliformes fecales) y parásitos (huevos de helmintos).

En la Tabla 9 se observa que la eficiencia de remoción de materia orgánica, medida como DBO₅, es mayor que 95%, y 88% cuando se aplica DQO. Toxicidad, SST, Grasas y Aceites y Fósforo total se remueven también con eficiencias altas.

A pesar del buen desempeño de los sistemas de tratamiento no es suficiente para que las concentraciones de los parámetros analizados sean menores o iguales que los LP de la NOM-001-SEMARNAT-2021.

Los efluentes únicamente cumplen con los LP de la NOM-001-SEMARNAT-2021 para temperatura, pH, y en la mayoría de los casos con Grasas y Aceites.

En términos de DQO, los límites permisibles se rebasan entre 7 y 144 veces, en tanto que para el nitrógeno total se rebasan entre 24 y 1000 veces. Por su parte Fósforo total, Sólidos Suspendidos Totales y Toxicidad también rebasan los límites permisibles, las magnitudes en que se rebasan son variables, pero sin duda los efluentes de las diez granjas porcícolas analizadas no satisfacen los requisitos de NOM-001-SEMARNAT-2021.

Dado que las concentraciones iniciales de los contaminantes son muy elevadas, es necesario alcanzar niveles de remoción mayores al 99 % para todos los parámetros para que los efluentes puedan cumplir con los límites permisibles de la NOM-001-SEMARNAT-2021.

Todas las granjas están equipadas con biodigestores, el efluente de dichas unidades de proceso es rico en nitrógeno amoniacal, ya que prácticamente todo el nitrógeno orgánico en los reactores anaerobios es transformado en nitrógeno amoniacal (IWA, 2011), y que, por las características de las lagunas facultativas, solo una fracción es oxidada. Así el efluente de las lagunas lleva concentraciones muy importantes de nitrógeno amoniacal que se encuentra “químicamente reducido y, en consecuencia, puede fácilmente ser oxidado en aguas naturales, resultando en la consunción y disminución del oxígeno disuelto (Paredes, *et al.* 2007)”, es decir es una sustancia consumidora de oxígeno y por lo mismo tiene asociada una demanda química de oxígeno (DQO), está será directamente

proporcional a la concentración en el efluente. Con la conformación actual de los sistemas de tratamiento de las granjas, no es posible que alcancen los niveles de remoción requeridos para cumplir con la NOM-001-SEMARNAT-2021.

Así, dado que las concentraciones de nitrógeno en el agua tratada son muy altas, estas contribuyen en forma importante para que la DQO sea elevada. Por ello, como parte de las adecuaciones que se requieren en estos sistemas de tratamiento, es la implementación de procesos para la remoción de nitrógeno del agua.

Es necesario que los procesos que se incluyan tengan la capacidad de transformar el nitrógeno amoniacal en nitratos, para que estos a su vez puedan ser transformados en nitrógeno elemental (N₂), esto se reflejará en una disminución sustancial de la DQO ya que el nitrógeno amoniacal consume oxígeno para ser transformado en nitritos y nitratos.

Además de la adición de unidades de proceso, la mayoría de las lagunas de estabilización instaladas requieren de desazolve y, en varios casos la inclusión de mamparas para asegurar que exista un flujo pistón y se eviten cortos circuitos. De esta manera se optimizaría el tiempo de retención hidráulico en la laguna, así como el nivel de tratamiento que pueden ofrecer. Si bien, esto no será suficiente para alcanzar los LP de la norma, permitirán que las unidades adicionales de tratamiento tengan mayor holgura en su desempeño para el cumplimiento de la NOM 001- SEMARNAT-2021.

El adoptar procesos de coagulación-floculación para el pos-tratamiento tendrá poca efectividad en la remoción de contaminantes del agua residual, ya que la mayor parte de la DQO se encuentra en forma soluble y este tipo de procesos son poco efectivos en la remoción de la DQO disuelta y que en todos los casos es mayor que los 60 mg/L establecidos como límite permisible para suelos cársticos.



6. DIAGNÓSTICO DE AIRE

La emisión de contaminantes a la atmósfera generados por las granjas porcinas y avícolas puede tener su origen principal en la descomposición de las excretas y la dieta de los animales. Dichas emisiones son responsables de generar diversos problemas que afectan la atmósfera, el medio ambiente circundante y la salud de las poblaciones ubicadas en las inmediaciones de las granjas.

Las emisiones de ácido sulfhídrico (H_2S) y Amoniac (NH₃), además de contribuir en la eutrofización del agua y la acidificación del suelo y agua tiene impactos directos en la salud de la población. La emisión de Metano (CH₄), el cual a escala global es considerado como contaminante climático de vida corta, tiene una emisión estimada de aproximadamente 535 millones de toneladas, de las cuales 160 se producen de forma natural y 375 derivan de la actividad antropogénica (Houghton *et al.*, 1996), siendo la ganadería responsable del 23% de las emisiones de origen antropogénico (Khalil, 2000).

El sector agropecuario a escala global es una de las principales fuentes de emisión de NH₃, de las cuales aproximadamente el 64% está asociada a la ganadería. En el caso de la ganadería porcina, las emisiones de NH₃ se presentan en los alojamientos de los animales y durante el almacenamiento procesado y aplicación en el campo del purín o estiércol. De acuerdo con Coma y Bonet (2004), un metro cúbico de purines contiene: 7.6 kg de nitrógeno total; 6.5 kg de fosfatos (P₂O₅); 7.2 kg de potasio (K₂O); 47 kg de DQO; 25 kg de DBO₅, etc. Por lo que, si no se dispone adecuadamente de él, en lugar de elementos fertilizantes, se tienen elementos contaminantes.

Los purines y estiércol son ricos en nitrógeno; del cual una parte muy importante se encuentra en forma amoniacal (75% en porcino, 85% en aves, 60% en vacuno de leche). Dentro del purín, el amoniaco está en equilibrio entre una forma iónica soluble en agua (NH₄⁺) y una forma gaseosa (NH₃). La forma gaseosa se volatiliza al contacto de la superficie del purín/estiércol con el aire circundante de tal forma que se produce una emanación de amoniaco al aire de forma continua, siendo el principal gas emitido a la atmósfera en las explotaciones ganaderas.

Además, dado que el NH₃ se convierte fácilmente en NH₄⁺ o se somete a deposición seca, las altas concentraciones se encuentran solo cerca de la superficie y cerca de las fuentes de emisión (Fenn, 1998).

En este sentido, el amoniaco es un gas incoloro de olor fuerte, soluble en agua y más ligero que el aire, en áreas remotas, las concentraciones de NH₃ pueden ser bastante bajas (0.04 a 5.60 µg/m³), mientras que cerca de fuentes como áreas agrícolas y granjas, pueden ser tres órdenes de magnitud mayores (Alkezweeny *et al.*, 1986). El amoniaco proviene principalmente de la degradación de la urea presente en la orina. Esta degradación está producida por el enzima ureasa presente en las heces y comienza inmediatamente en cuanto se ponen en contacto con el aire.

Como se ha comentado anteriormente, el amoniaco es el principal gas emitido en las explotaciones ganaderas, siendo el gas responsable de la acidificación de los suelos y la eutrofización de los ecosistemas. La urea, y por lo tanto el amoniaco tienen su origen en el nitrógeno que consumen los animales en los piensos y forrajes, es decir, en la proteína bruta de dichos alimentos. Una vez absorbida, la proteína sufre un proceso metabólico por el cual una parte de esta pasa a formar parte de los tejidos o producciones de los animales (crecimiento, leche, fetos, etc.), mientras que el resto se elimina por la orina en forma de urea que pasa al purín, siendo susceptible de degradarse hasta amoniaco. Con el objeto de realizar la determinación de las concentraciones ambientales de contaminantes atmosféricos, climáticos de vida corta y la caracterización de suelos en tres granjas porcinas ubicadas en el Estado de Yucatán. Del 17 al 21 de octubre de 2022 personal del Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC) realizó la medición de los contaminantes atmosféricos y climáticos de vida corta mediante una unidad móvil de monitoreo equipada con analizadores automáticos, en conjunto con una colecta de muestras de suelos y lodos de las plantas de tratamiento de excretas líquidas.

OBJETIVO GENERAL

Realizar un diagnóstico del impacto ambiental de la actividad porcina mediante la caracterización de la presencia de contaminantes atmosféricos y climáticos de vida corta, así como de elementos tóxicos en suelos de tres granjas porcinas en el Estado de Yucatán.

OBJETIVOS PARTICULARES

- Determinar posibles impactos socioambientales de la actividad porcina.
- Establecer un diagnóstico de primera aproximación de las concentraciones de amoníaco y ácido sulfhídrico como fuentes de área.
- Identificar el área de influencia de la concentración de contaminantes dentro de las granjas y su potencial alcance local, mediante el análisis de la dinámica atmosférica durante el periodo de medición.
- Contextualizar las concentraciones determinadas dentro de las granjas con las mediciones de concentraciones ambientales realizadas en la ciudad de Mérida.

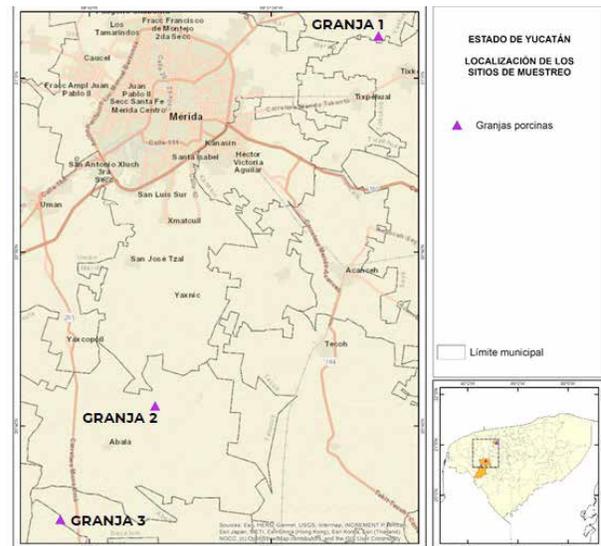
ÁREA DE ESTUDIO

De la semana del 17 al 21 de octubre del 2022 se realizó una campaña de primera aproximación para determinar las concentraciones ambientales de los principales contaminantes atmosféricos y climáticos de vida corta reportados en la literatura científica que indican que son emitidos en las granjas porcinas, cuantificando tres compuestos: amoníaco, metano y ácido sulfhídrico. Dicha campaña se realizó en tres granjas porcinas ubicadas en el Estado de Yucatán en las siguientes coordenadas (ver Tabla 12) y como se pueden ver en la Figura 34, todas ubicadas en las inmediaciones de Mérida.

Tabla 12. Coordenadas de las granjas donde se realizó el monitoreo atmosférico y la caracterización de suelos.

Granja	Latitud	Longitud
Granja 1	21.039113	-89.420666
Granja 2	20.695605	-89.671576
Granja 3	20.795264	-90.136284

Figura 34. Ubicaciones de las tres granjas porcícolas donde se realizaron las mediciones



En los mismos puntos se colectaron muestras de suelo y de lodos generados en las granjas conforme a la tabla siguiente.



Tabla 13. Identificación de muestras de suelo

Identificación	Ubicación	Identificación	Ubicación
S3	GRANJA 2	SIA5	GRANJA 3
LK2	GRANJA 2	LodoM1	GRANJA 3
S3	GRANJA 1		

MÉTODO Y EQUIPOS

Para la determinación de las concentraciones ambientales de contaminantes criterio y climáticos de vida corta se empleó un conjunto de analizadores automáticos de la marca Environnement S.A.

Los contaminantes monitoreados fueron; amoníaco, metano, ácido sulfhídrico y dióxido de azufre,

así como, parámetros meteorológicos, de los cuales se listan sus características técnicas en la siguiente tabla.

Tabla 14. Equipos automáticos del laboratorio móvil del INECC empleados durante las mediciones.

Equipo	Marca y modelo	Características técnicas
Amoniaco	Environnement S.A., mod. CNH3	Rangos de medida (programable): 0,10 / 0,25 / 0,50 / 1 ppm Límite inferior detectable (2σ): < 0,001 ppm NH ₃ --> NO convertidor: temperatura 980°C Temperatura de operación: 10°C a 35°C
Hidrocarburos totales y no metano	Environnement S.A., mod. HC 51M	Mediante detector de ionización de flama (FID) Rangos de medida (programable): Auto, 10, 50, 100, 500, 1000 ppm o específico Mínimo detectable (2σ): 0.05 ppm Tiempo de respuesta: Automático (10 seg. en modo THC continuo) Linealidad: + 1 % Repetibilidad: 1 % Temperatura de operación: 10°C a 35°C
Dióxido de azufre y sulfuro de hidrógeno	Environnement S.A., mod. AF-22M	Florescencia que producen las moléculas de SO ₂ al absorber luz Rangos de medida (programable): hasta 10,00 ppm Ruido (σ): 0,0005 ppm (RT 120) Límite inferior detectable (2σ): 0.001 ppm (RT 120) Linealidad: \pm 1% Influencia H ₂ O: Nulo Influencia de la temperatura: 0,3 ppb/°C Temperatura de operación: 10°C a 35°C



Equipo	Marca y modelo	Características técnicas
Estación meteorológica	Piranómetro (Kipp & Zone CMP6-L37); Temperatura y humedad (Campbell Scientific HC2S3-L37); Pluviómetro (Hidrological Services CS700); Presión (Vaisala PTB110); Velocidad y dirección de viento (YOUNG 05103)	<p>Rango espectral piranómetro (total): 285 a 2800 nm Sensibilidad piranómetro: 5 a 20 $\mu\text{V}/\text{W}/\text{m}^2$ Tiempo de respuesta piranómetro: 18 s</p> <p>Rango de medida de temperatura: -40° a $+60^\circ\text{C}$ Precisión temperatura: $\pm 0.1^\circ\text{C}$ Rango de medida de humedad: 0 a 100% RH Precisión de humedad: $\pm 0.8\%$ RH</p> <p>Rango medición presión: 500 a 1100 hPa Exactitud presión: ± 0.3 hPa (@ $+20^\circ\text{C}$)</p> <p>Rango velocidad. viento: 0 a 100 m/s (224 mph) Rango dirección. Viento: 360° mecánico</p>

Como parte de los controles implementados para garantizar la confiabilidad de la información a generar, a todos los analizadores se les realizó una verificación multipunto, previo y posterior a la realización

de las mediciones, de acuerdo con el procedimiento establecido por el fabricante y empleando mezclas EPA.

Figura 35. Proceso de instalación y operación de unidad móvil para determinación de concentraciones ambientales, en granjas ubicadas en el estado de Mérida



Para la determinación de metales y sales en suelo, se realizó una campaña de muestreo exploratorio puntual en los sitios descritos en la Tabla 12 del presente documento.

Las muestras de suelo fueron de tipo simple de una profundidad de 0-5 cm a partir de la superficie. Posteriormente, todas las muestras fueron trasladadas a los laboratorios del INECC para su análisis.



Análisis químico y cuantificación de metales

Con el objetivo de determinar la presencia de los elementos presentes en las muestras colectadas, se llevó a cabo la cuantificación de los siguientes elementos: Ag, Al, As, Ba, Be, Ca, Cd, Co, Cr, Cu, Fe, K, Li, Mg, Mn, Mo, Na, Ni, Pb, Sb, Se, Sn, Sr, Ti, Tl, V, Zn.

El proceso de análisis inició con la preparación de las muestras de acuerdo con lo que marcan los procedimientos desarrollados por los laboratorios del INECC, en los cuales se indica que la muestra se digiere en medios ácidos con el fin de permitir que los elementos se encuentren en una forma apropiada para que puedan ser cuantificados y libres del efecto de matriz. Posteriormente, se realizó la determinación de la concentración en las muestras por dos técnicas diferentes:

- Espectroscopia de emisión óptica acoplada a plasma de acoplamiento inducido (ICP-OES), y

- Espectrometría de masas acoplada a plasma de acoplamiento inducido (ICP-MS).

En el análisis que se realizó a través de la técnica de ICP-OES (Figura 36), la muestra en disolución fue aspirada continuamente a un plasma de argón, donde los analitos de interés se atomizan y, debido a la alta energía del plasma, pasan a un estado excitado. Posteriormente, cuando estos átomos regresan a su estado basal, emiten energía en forma de radiación electromagnética, la cual puede ser identificada por el detector del equipo. La energía asociada con la radiación que emite cada elemento es única y puede ser seleccionada para realizar una correlación entre la cantidad de radiación que llega al detector y la concentración de cada uno de los elementos presentes en la muestra, de tal forma que es posible generar una curva de calibración a partir de la cual, se puede calcular la concentración de cada uno de ellos.

Figura 36. Determinación de metales en las muestras de suelo por ICP-OES



En el análisis por ICP-MS (Figura 8), las muestras que ya habían sido preparadas, fue atomizada en el plasma generado a partir del gas argón de alta pureza y, derivado de las altas temperaturas, los metales presentes se ionizan y una vez ionizados son introducidos al analizador másico, en donde son separados en función de su relación masa sobre carga (m/z). El patrón isotópico para cada elemento a analizar es conocido y permite generar una relación entre las cuentas por segundo que determina el equipo y la concentración de los analitos en las muestras. Esta determinación permite alcanzar concentraciones por debajo de los $\mu\text{g/L}$ lo que amplía el alcance de las determinaciones realizadas por los laboratorios del INECC.

Figura 37. Determinación de metales en las muestras de suelo por ICP-MS



Con el objetivo de determinar la presencia de aniones y cationes presentes en las muestras colectadas, se llevó a cabo la cuantificación de los siguientes iones: fluoruro (F⁻), cloruro (Cl⁻), nitrito (NO₂⁻), bromuro (Br⁻), nitrato (NO₃⁻), fosfato (PO₄³⁻), sulfato (SO₄²⁻), litio (Li⁺), sodio (Na⁺), amonio (NH₄⁺), potasio (K⁺), magnesio (Mg²⁺) y calcio (Ca²⁺).

Figura 38. Determinación de aniones y cationes en las muestras de suelo por HPIC



El proceso de análisis inició con la preparación de las muestras de acuerdo con lo que marcan los procedimientos desarrollados por los laboratorios del INECC, en los cuales se indica que la muestra es extraída y posteriormente analizada por cromatografía iónica con supresión química (Figura 38)

RESULTADOS

A continuación, se presentan los resultados obtenidos de la campaña de primera aproximación, durante la cual se determinaron las concentraciones de contaminantes atmosféricos en tres granjas: Granja 1 (19-20 de octubre 2022), Granja 2 (18-19 octubre 2022) y Granja 3 (17-18 octubre 2022). Las mediciones en cada sitio se realizaron en periodos de al menos 24 horas.

CONTAMINANTES ATMOSFÉRICOS

La Figura 39, muestra las concentraciones ambientales promedio de amoniaco dentro de las granjas y como contexto la concentración ambiental de amoniaco en la ciudad de Mérida. Las concentraciones determinadas en granjas — granja 1 (84 ppm), granja 2 (252 ppm) y granja 3 (467 ppm)— puede ser de 3 a 15 veces superior que la registrada en la ciudad de Mérida (32 ppb).





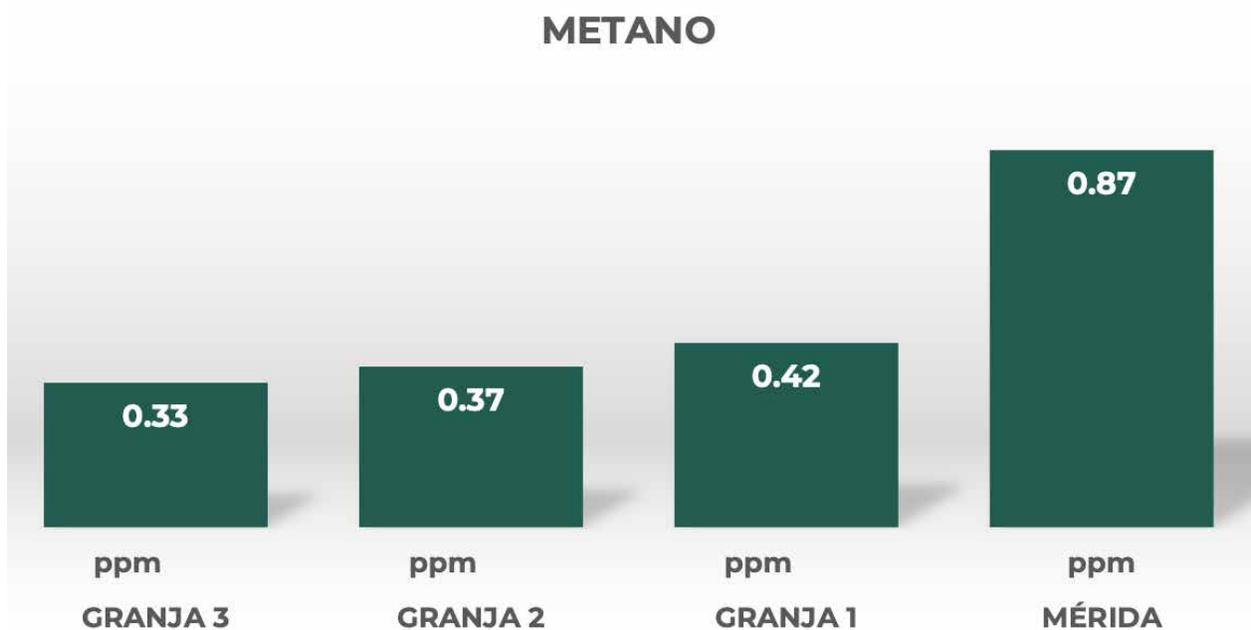
Figura 39. Concentración de amoníaco (NH_3)- Promedio de 24 horas



Contrario a lo que sucede con el amoníaco, la concentración ambiental promedio de metano (0.87 ppm) en la ciudad de Mérida supera de 2 a

3 veces las concentraciones medidas en granjas — granja 1 (0.42 ppm), granja 2 (0.37 ppm) y granja 3 (0.33 ppm)— (Figura 40).

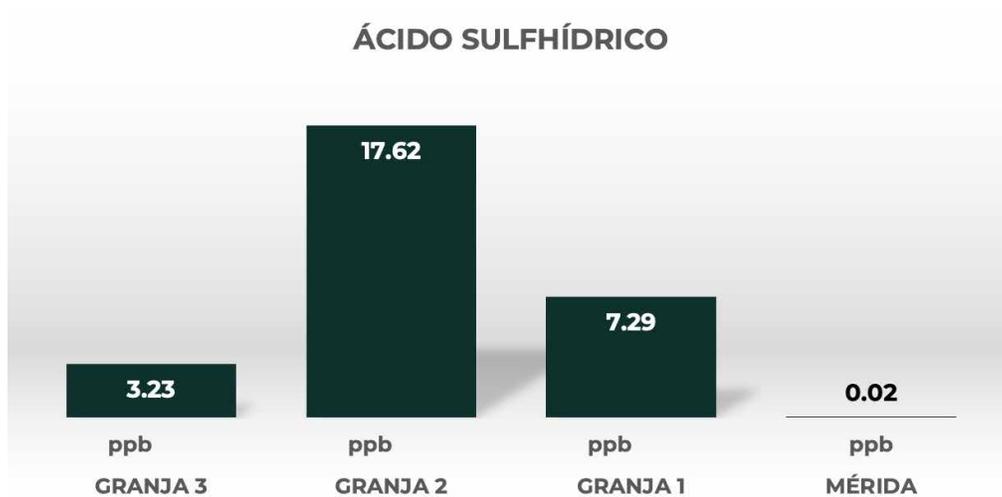
Figura 40. Concentraciones promedio de 24 horas, de metano



Respecto al ácido sulfhídrico, las concentraciones ambientales en la ciudad de Mérida fueron las más bajas, de los cuatro sitios considerados durante la campaña, pero las concentraciones ambientales se

elevan dentro de las granjas, reportando valores de: granja 1 (7.29 ppm), granja 2 (17.62 ppm) y granja 3 (3.23 ppm), ver Figura 41.

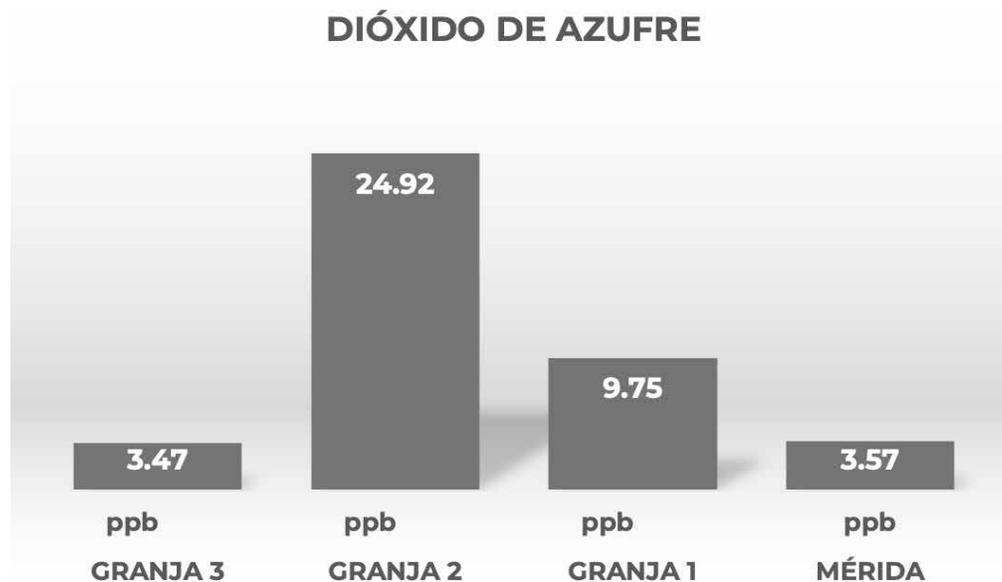
Figura 41. Concentraciones promedio, de 24 horas, de ácido sulfhídrico (H₂S) en los cuatro sitios considerados en la campaña de mediciones



De igual manera que con el ácido sulfhídrico, en la zona de la granja 2 se registra la concentración más alta de dióxido de azufre (25 ppb), lo cual es ocho veces más que el dióxido de azufre registrado

en Mérida. En la granja 1 se determinó una concentración de aproximadamente 9 ppb que casi triplica la concentración determinada en Mérida. (Figura 42).

Figura 42. Concentraciones promedio, de 24 horas, dióxido de azufre

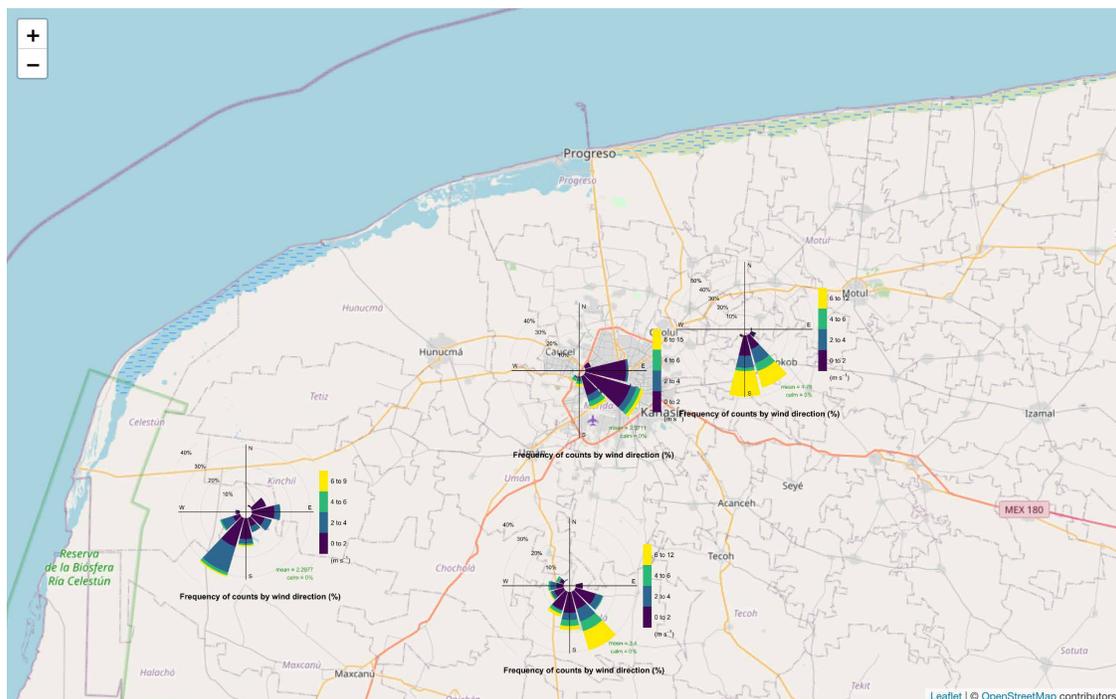


Rosa de Vientos y de contaminantes

Las siguientes gráficas, muestran la dirección hacia donde se transportan los contaminantes que pueden ser emitidos por las granjas o transportados hacia las granjas, lo anterior a partir de las mediciones realizadas. Se determinó una variación de velocidades de viento máximas de 6

a 15 m/s. Durante este periodo de evaluación, los vientos llegan desde el norte y noreste a la zona de la granja 1, granja 2 y la ciudad de Mérida. La zona de la granja 3 también registró vientos que provienen del norte y noreste, pero las velocidades máximas registradas provienen del noreste (Figura 43).

Figura 43. Rosas de Vientos de los sitios de muestreo.

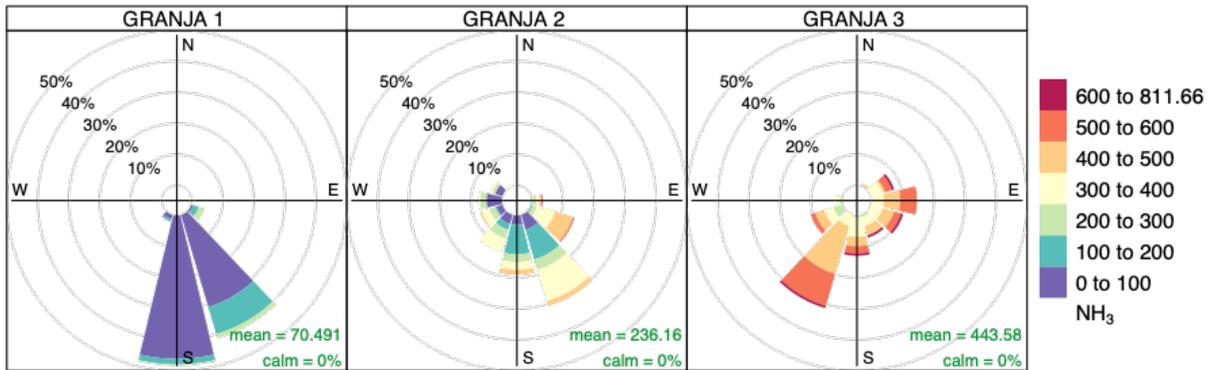


En la granja 3, las altas concentraciones de amoníaco pueden tener una contribución por fuentes presentes en su entorno, pero al presentar periodos de bajas velocidades de viento y altas concentraciones de amoníaco se puede inferir que hay una gran emisión local (Figura 44). En la granja 2 también se observa que el amoníaco monitoreado es de emisión local y las mayores concentraciones llegan desde el noreste de la zona. En la granja 1 se puede identificar contribuciones de fuentes ubicadas en el norte y noreste, con respecto al punto

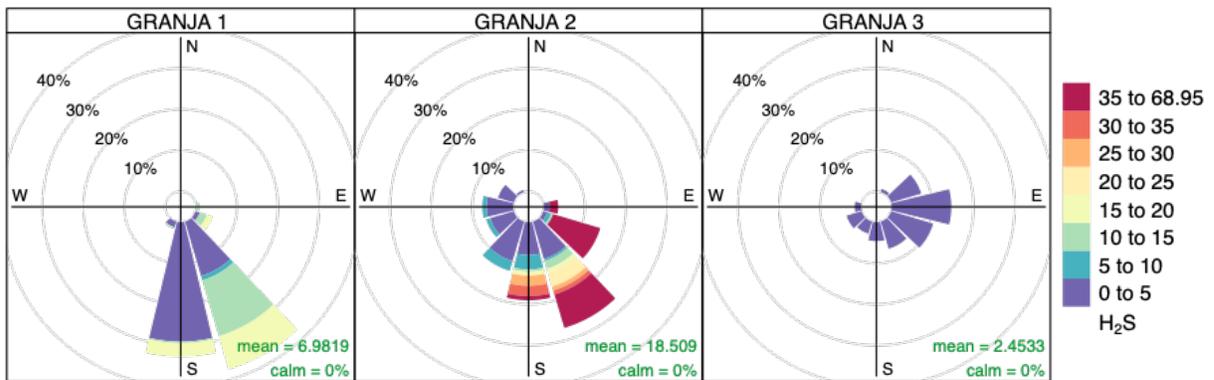
de medición, sin embargo, las concentraciones de amoníaco son bajas en comparación con los otros sitios de monitoreo (Figura 44).

Respecto al ácido sulfhídrico (Figura 44), las concentraciones más altas se registraron cuando se presentan contribuciones de fuentes ubicadas al norte y noreste en los sitios de monitoreo, siendo la granja 2 el área que más altas concentraciones registra de los tres sitios de monitoreo.

Figura 44. Rosa de amoníaco y ácido sulfhídrico en granjas monitoreadas.



Frequency of counts by wind direction (%)

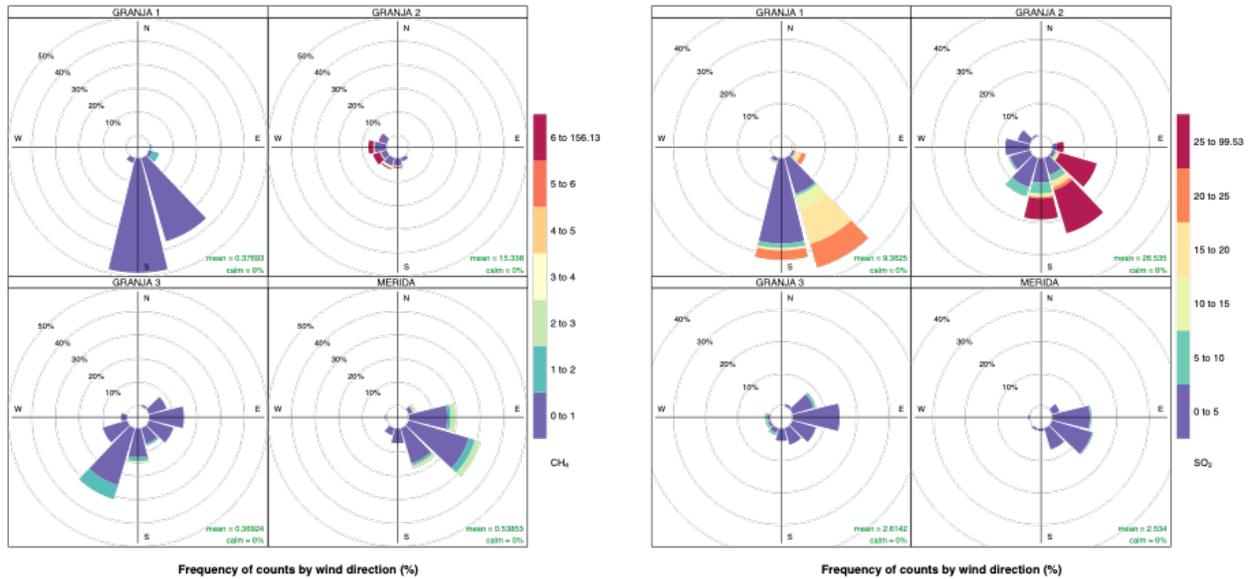


Frequency of counts by wind direction (%)

Los sitios de muestreo de la granja 1 y la ciudad de Mérida estuvieron influenciadas por vientos del norte y noreste, registrando las más altas

concentraciones de metano en la zona urbana de Mérida. En la granja 2 se registró concentraciones de metano provenientes del noreste (Figura 45).

Figura 45. Rosa de metano y dióxido de azufre en sitios de muestreo

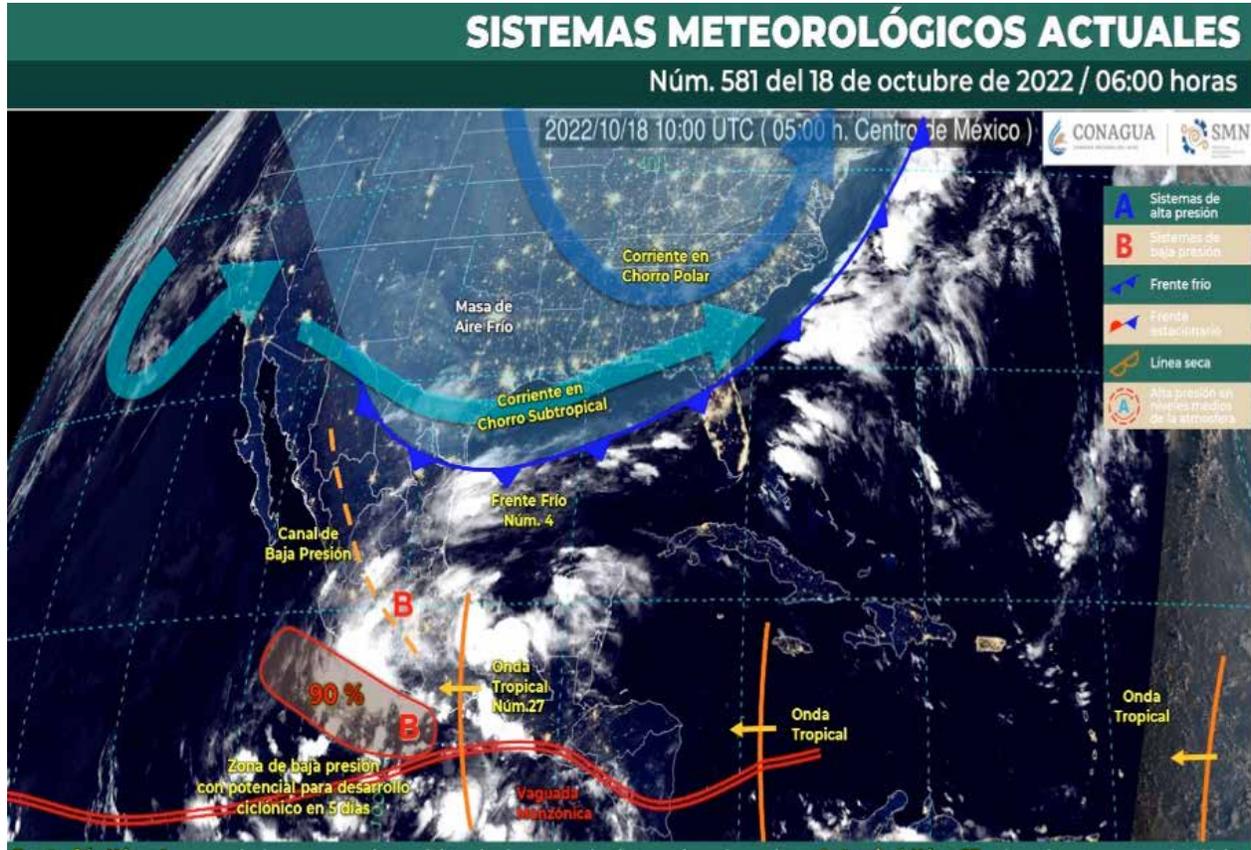


Las mayores concentraciones de dióxido de azufre fueron registradas en las granjas 1 y 2, con contribuciones que provienen de fuentes ubicadas al norte y noreste de los sitios de muestreo, mientras que en la granja 3 la predominancia de vientos en ese periodo aportó dióxido de azufre desde el este, aunque las mayores concentraciones registradas en este lugar provienen del suroeste (Figura 45)

Modelación de liberación de emisiones y su potencial área de influencia

Durante la semana de mediciones se presentaron diversos meteoros en el país, los cuales influenciaron en las mediciones realizadas en las zonas de granjas de Mérida, la presencia del frente frío n° 4, la onda tropical número 27, así como la entrada del frente frío y un evento de Norte, generaron lluvias y rachas de viento importantes en la zona de la península de Yucatán, las cuales se pueden apreciar en la Figura 46, y que fueron evaluados mediante el modelo HYSPLIT de la NOAA para evaluar el radio de influencia de las emisiones de gases en cada granja.

Figura 46. Imagen de los diferentes sistemas meteorológicos del 18 de octubre del 2022



Con la finalidad de tener una visión regional del posible patrón de transporte de contaminantes, se realizó la estimación de campos de viento en la península de Yucatán, donde se encuentran las granjas porcinas. En este sentido, las condiciones de viento prevalecientes el 19 de octubre de 2022, ejemplifican los patrones que se presentan en la zona de estudio.

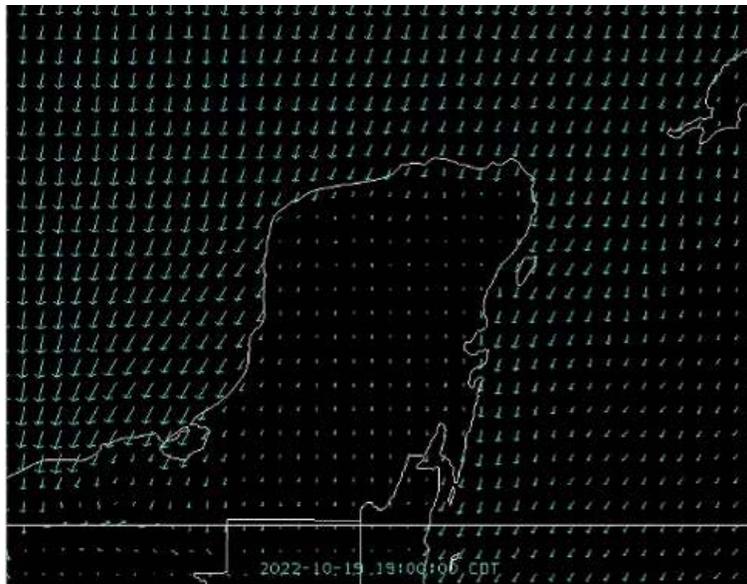
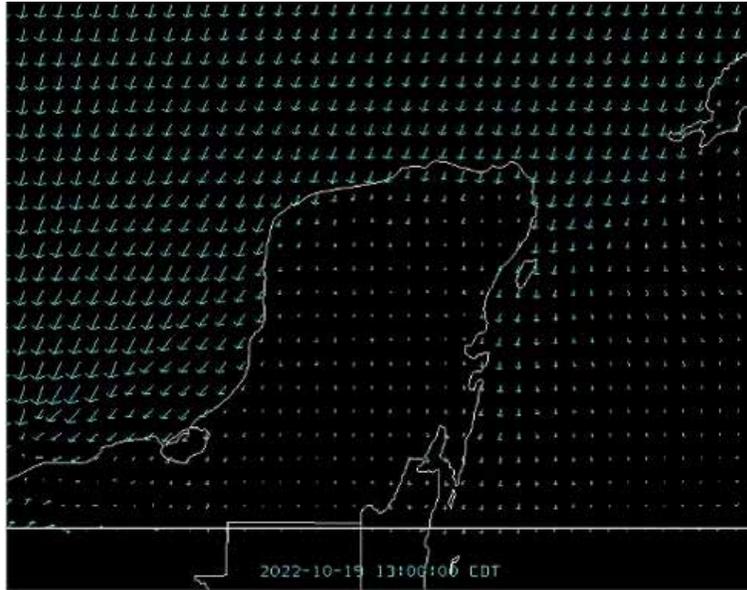
En la Figura 47 se presentan los campos de viento estimados para la península de Yucatán, en los cuales se puede observar que el patrón de las brisas marinas domina el flujo de viento. A la 1 am, se observa que el viento proveniente del Golfo de México incide en el norte y oeste de la península; mientras que en la costa del Mar Caribe la brisa induce que el viento provenga del este. Este patrón es muy similar

a las 7 am; por lo que en la región de estudio y al sur de esta se podrían presentar condiciones de convergencia en superficie y de divergencia en altura, mismas que favorecerían el transporte de contaminantes hacia la parte centro y sur de la península.

Por la tarde, a la 1 pm, se presenta un campo de viento en el cual se observa que domina la componente del norte, y tanto el viento que proviene del Golfo de México, como el de la costa este, favorecen que en la zona peninsular el viento prevaleciente sea hacia el sur. Este patrón se mantiene y se intensifica a las 7 pm, por lo que se estima que una emisión de contaminantes en la zona de estudio sería transportada principalmente hacia el sur, generando una fumigación de corto alcance (entre 5 y 10 km) en las localidades ubicadas al sur de las fuentes.



Figura 47. Campos de viento modelados para las 1, 7, 13 y 19 horas.



En este sentido se simularon durante los días de monitoreo la liberación de gases en forma de PUFF de las zonas de granja para establecer como una

primera aproximación los radios de influencia de cada una, como se pueden observar en las Figuras 48, 49 y 50.



Figura 48. Liberación de un PUFF de emisión y su área de influencia en la granja 3 el 18 de octubre del 2022



Figura 49. Liberación de un PUFF de emisión y su área de influencia en la granja 2, el 19 de octubre del 2022

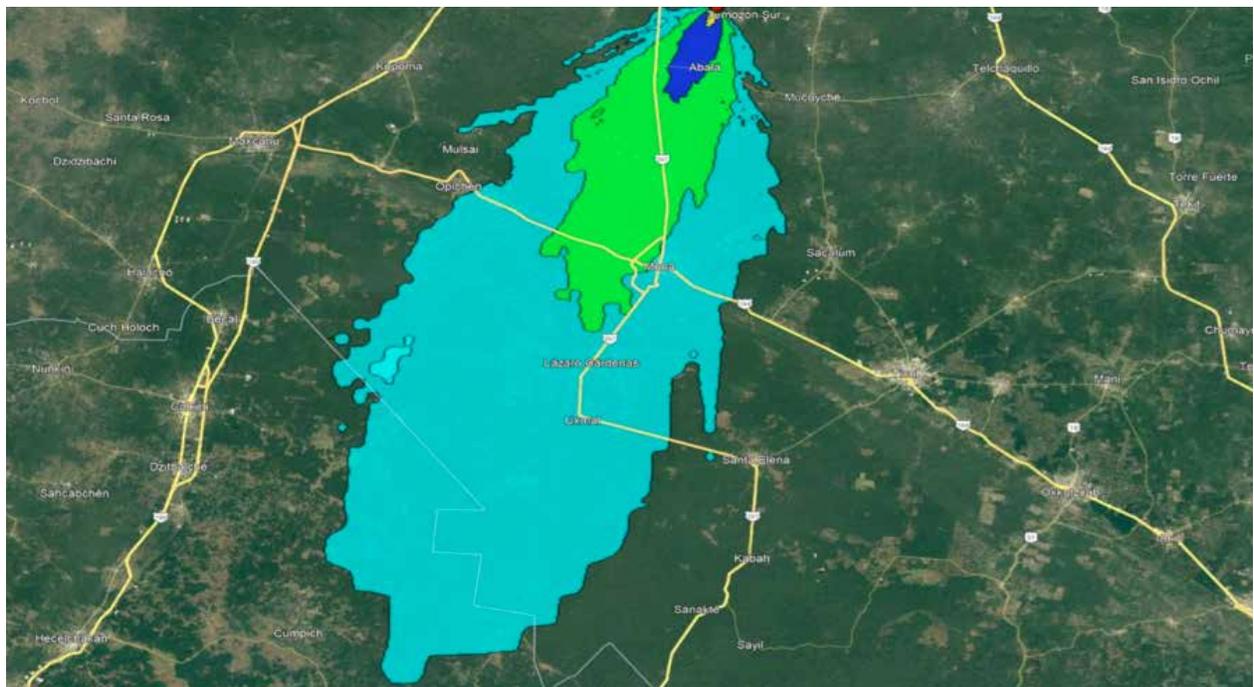
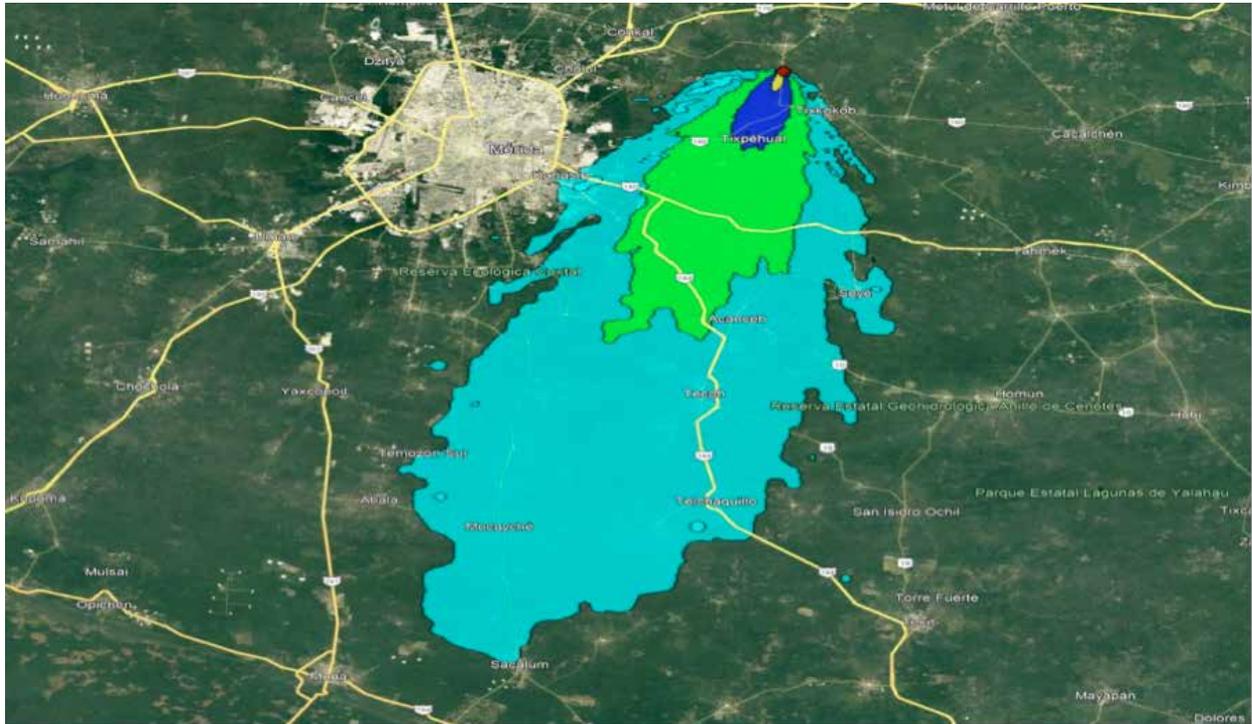


Figura 50. Liberación de un PUFF de emisión y su área de influencia en la granja 1, el 20 de octubre del 2022



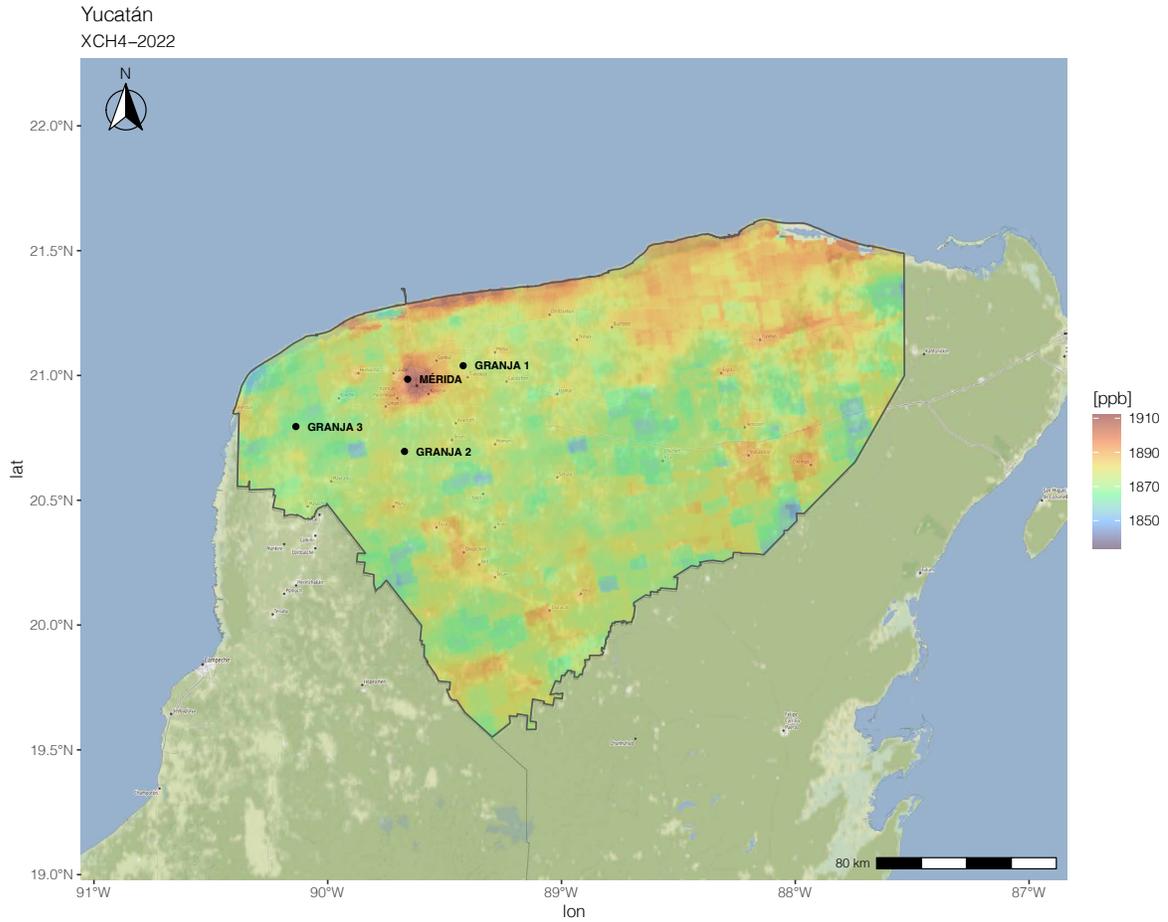
Distribución espacial de Metano (CH₄)

La información de las columnas de metano determinadas desde la plataforma Sentinel 5-P, TROMPOMI por sus siglas en inglés (Tropospheric Monitoring Instrument), muestran la presencia de metano en superficie en el Estado de Yucatán, principalmente en zonas agrícolas. La Figura 22 representa la relación de mezcla XCH₄ (methane

mixing ratio) que se obtiene de las subcolumnas verticales de metano y de la columna de aire seco. La imagen refuerza la medición realizada en superficie por el laboratorio móvil del INECC, donde los valores más altos de metano en superficie se observan en la ciudad de Mérida.



Figura 51. Imagen de las columnas satelitales de metano XCH₄ (methane mixing ratio) en el Estado de Yucatán promedio del periodo de 01/01/2022 al 01/11/2022. Elaboración INECC. Datos Sentinel-5P, Tropomi.



7. DIAGNÓSTICO DE SUELO

USO DE SUELO Y VEGETACIÓN

Con la finalidad de establecer un escenario de cambio de uso y suelo de las áreas de estudio, se realizó mediante un sistema de información geográfica la sobreposición de la cobertura de uso de suelo y vegetación para los años 2005 y 2018 del INEGI, dichas capas poseen información geoespacial donde se observa la distribución del uso del suelo agrícola,

de la vegetación natural e inducida de la región, además indica el uso pecuario y forestal y otros usos que se presentan relacionados con la cubierta vegetal con fines estadísticos y geográficos. En las tablas 15, 16 y 17 se muestran las áreas de las granjas y el cambio de uso de suelos impactados por la instalación de las granjas para el año 2018.

Tabla 15. Granja 1, y el uso de suelo INEGI 2018

Granja 1	Área (Ha)
Vegetación secundaria arbórea de selva mediana caducifolia	10.70
Agricultura de temporal anual	7.56
Desprovisto de vegetación	28.58
Total	46.83



Tabla 16. Granja 2, y el uso de suelo INEGI 2018

Granja 2	Área (Ha)
Agricultura de temporal permanente	4.08
Vegetación secundaria arbórea de selva baja caducifolia	18.93
Desprovisto de vegetación	22.24
Total	45.25



Tabla 17. Granja 3, y el uso de suelo INEGI 2018

Granja 3	Área (Ha)
Vegetación secundaria arbórea de selva mediana caducifolia	299.97
Vegetación secundaria arbórea de selva baja caducifolia	1,125.55
Vegetación secundaria arbustiva de selva baja caducifolia	90.77
Desprovisto de vegetación	26.93
Total	1,543.22



Cambio de uso de suelo [2005 vs 2018]

En las siguientes tablas se puede apreciar el cambio de uso de suelo que, conforme a los conjuntos de datos vectoriales de la Carta de Uso del Suelo y Vegetación, Escala 1:250,000, Serie III (Continuo Nacional) 2005, se puede comparar versus el

conjunto de datos vectoriales de Uso del Suelo y Vegetación, Escala 1:250,000 – Serie VII. 2018, de las de las tres granjas porcinas donde se realizaron las mediciones.

Tabla 18. Cambio de uso de suelo y vegetación de las poligonales alrededor de la granja 1, comparando el conjunto de datos vectoriales de la Carta de Uso del Suelo y Vegetación, Escala 1:250,000, Serie III (Continuo Nacional) 2005, versus el conjunto de datos vectoriales de Uso del Suelo y Vegetación, Escala 1:250,000 – Serie VII. 2018.

Granja 1					
Tipo de vegetación y uso de suelo 2005 *	Hectáreas		Tipo de vegetación y uso de suelo 2018**		
			Agricultura de temporal anual	Desprovisto de vegetación	Vegetación secundaria arbórea de selva mediana caducifolia
Agricultura de temporal	0.04	➔	0.04	0	0
Vegetación secundaria arbórea de selva mediana Caducifolia	46.79	➔	7.51	28.58	10.7
Total (hectáreas)	46.83	➔	7.55	28.58	10.7





Tabla 19. Cambio de uso de suelo y vegetación de las poligonales alrededor de la granja 2, comparando el conjunto de datos vectoriales de la Carta de Uso del Suelo y Vegetación, Escala 1:250,000, Serie III (Continuo Nacional) 2005, versus el conjunto de datos vectoriales de Uso del Suelo y Vegetación, Escala 1:250,000 – Serie VII. 2018.

Granja 2					
Tipo de vegetación y uso de suelo 2005 *	Hectáreas		Tipo de vegetación y uso de suelo 2018**		
			Vegetación arbustiva de selva baja Caducifolia	Agricultura de temporal	Desprovisto de vegetación
Vegetación arbustiva de selva baja Caducifolia	19.73	➔	18.74	0.42	0.57
Agricultura de temporal	25.52	➔	0.19	3.66	21.67
Total (hectáreas)	45.25	➔	18.93	4.08	22.44

Tabla 20. Cambio de uso de suelo y vegetación de las poligonales alrededor de la granja 3, comparando el conjunto de datos vectoriales de la Carta de Uso del Suelo y Vegetación, Escala 1:250,000, Serie III (Continuo Nacional) 2005, versus el conjunto de datos vectoriales de Uso del Suelo y Vegetación, Escala 1:250,000 – Serie VII. 2018.

Granja 3						
Tipo de vegetación y uso de suelo 2005 *	Hectáreas		Tipo de vegetación y uso de suelo 2018**			
			Desprovisto de vegetación	Vegetación secundaria arbórea de selva baja	Vegetación secundaria arbórea de selva mediana caducifolia	Vegetación secundaria arbustiva de selva baja caducifolia
Pastizal cultivado	342.46	➔	0	226.18	25.34	90.94
Vegetación secundaria arbórea de selva mediana caducifolia	1,200.76	➔	26.96	899.37	274.46	0
Total (hectáreas)	1,543.22	➔	26.93	1,125.55	299.8	90.94

Evaluación de suelos en granjas porcinas

En el interés de conocer el impacto de las descargas de aguas residuales realizadas por las granjas, se muestrearon suelos en cada una de las visitadas, la muestra consta de 500g de suelo la cual se colectó a unos 5 metros de distancia a los equipos de dispersión (cañones).

El muestreo se realizó en compañía del personal de las granjas, las muestras fueron tomadas mediante sonda de muestreo manual (nucleador) y pala, estos suelos al ser arcillosos presentan poca materia orgánica, por lo que se evitará la colecta de rocas para el muestreo.

Figura 52. Sistema de riego para la dispersión de material orgánico proveniente de porquerizas



Las muestras son resguardadas hasta su llegada a laboratorio donde se determinan metales y

metales mediante ICP-OES e ICP-MS, obteniendo los siguientes resultados:



Tabla 21. Valores de metales y metaloides presentes en suelos de granjas porcinas.

Muestra	Ag(mg/Kg)	Al (mg/Kg)	As (mg/Kg)	Ba (mg/Kg)	Be (mg/Kg)
Granja 1	<0.04	***	53.6	211.3	2.5
Granja 2	<0.04	12629.0	5.3	113.9	<0.04
Granja 3	<0.04	***	71.7	168.8	3.5
Muestra	Ca (mg/Kg)	Cd (mg/Kg)	Co (mg/Kg)	Cr (mg/Kg)	Cu (mg/Kg)
Granja 1	9151.5	<0.04	14.4	94.1	79.1
Granja 2	***	<0.04	4.7	68.1	2925.0
Granja 3	18752.2	1.1	25.9	252.5	1235.3
Muestra	Fe (mg/Kg)	K (mg/Kg)	Mg (mg/Kg)	Mn (mg/Kg)	Mo (mg/Kg)
Granja 1	26165.9	***	4247.1	774.3	<0.04
Granja 2	15222.5	5950.6	10751.6	1584.2	6.3
Granja 3	31331.3	6121.7	4877.7	1213.7	2.1
Muestra	Na (mg/Kg)	Ni (mg/Kg)	Pb (mg/Kg)	Sb (mg/Kg)	Ti (mg/Kg)
Granja 1	1473.4	38.7	60.5	62.4	57.7
Granja 2	1218.0	40.0	21.8	<0.04	387.9
Granja 3	414.6	89.7	85.3	62.4	112.5
Muestra	V (mg/Kg)	Zn (mg/Kg)			
Granja 1	62.3	68.3			
Granja 2	37.7	3985.6			
Granja 3	87.9	1223.5			

Al determinar aniones y cationes por cromatografía iónica con supresión química, los resultados obtenidos fueron los siguientes:





Tabla 22. Valores de aniones y cationes presentes en suelos de granjas porcinas.

2

Muestra	Litio (mg/Kg)	Sodio (mg/Kg)	Amonio (mg/Kg)	Potasio (mg/Kg)	Magnesio (mg/Kg)
Granja 1	0.0	815.4	0.0	925.3	22.8
Granja 2	0.0	1075.0	0.0	3364.9	4469.7
Granja 3	0.0	191.1	0.0	1164.1	167.3
Muestra	Calcio (mg/kg)	Fluoruro (mg/kg)	Cloruro (mg/kg)	Nitrito (mg/kg)	Bromuro (mg/kg)
Granja 1	84.8	9.8	333.5	0.0	0.0
Granja 2	1626.0	0.0	842.0	0.0	0.0
Granja 3	398.0	0.0	45.7	0.0	0.0
Muestra	Fe (mg/Kg)	K (mg/Kg)	Mg (mg/Kg)	Mn (mg/Kg)	Mo (mg/Kg)
Granja 1	26165.9	***	4247.1	774.3	<0.04
Granja 2	15222.5	5950.6	10751.6	1584.2	6.3
Granja 3	31331.3	6121.7	4877.7	1213.7	2.1
Muestra	Nitrato (Mg/Kg)	Fosfato (Mg/Kg)	Sulfato (Mg/Kg)		
Granja 1	329.3	168.2	94.6		
Granja 2	14459.4	35032.3	0.0		
Granja 3	1551.3	2098.0	96.4		

Se evaluaron los lodos del proceso de tratamiento primario de efluentes líquidos, para la determinación de aniones y cationes, obteniendo los siguientes resultados:

Tabla 23. Valores de aniones presentes en lodos de granjas porcinas.

Muestra	Fluoruro	Cloruro	Nitrito	Bromuro	Nitrato	Fosfato	Sulfato
Granja 1	0.0	38111.0	1747.4	0.0	2615.9	31915.5	16027.0
Granja 2	0.0	12877.5	0.0	0.0	3913.5	22293.7	20904.0

Tabla 24. Valores de cationes presentes en lodos de granjas porcinas.

Muestra	Litio	Sodio	Amonio	Potasio	Magnesio	Calcio
Granja 1	0.0	14256.8	537.0	10143.7	5132.6	428.9
Granja 2	0.0	4121.4	956.4	5055.1	3226.3	448.2





Las altas concentraciones de nitratos y fosfatos en los suelos son indicadores de un continuo enriquecimiento por la liberación de los efluentes, bajo el supuesto de que fertilizan y mejoran la calidad del suelo. Sin embargo, liberaciones continuas sólo envenenan el suelo y lo vuelven poco fértil, ocasionando con ello la pérdida de vegetación.

Asimismo, la presencia de amonio en los lodos son un indicador de que los efluentes dispersados en el

suelo alimentan a los microorganismos que forman los nitratos tan abundantes identificados.

Las concentraciones de cobre, hierro, plomo y zinc indican que los efluentes están directamente relacionados con las altas concentraciones, ya que la literatura relaciona estos elementos con la actividad porcina, como es el caso del uso de antidiarreicos.





CONCLUSIONES

Respecto a los análisis de calidad del agua, se observa que la mayor parte de las muestras de agua subterránea en pozos y cenotes, se ubican en la zona de enriquecimiento de nitrógeno en suelo, inducido por un proceso difuso. Los cenotes presentan indicios de contaminación por materia orgánica fresca en gran medida por fuentes difusas de aguas residuales pecuarias, de ahí la presencia principalmente de nitrógeno amoniacal y concentraciones elevadas de *E. Coli* indicativo de contaminación difusa de excretas de seres vivos de sangre caliente.

No obstante, mediante el análisis estratificado de la zona sur y este de Mérida fue posible identificar la afectación de las granjas porcícolas sobre la calidad del agua subterránea, ya que de aguas arriba hacia aguas abajo, con la influencia de la granja en la zona central, se incrementa considerablemente: hasta 3 veces la concentración de Nitrógeno amoniacal.

En cuanto a fósforo se aprecia una acentuación de la presencia del contaminante en las zonas sur, este y noroeste, convergiendo con los municipios con mayor densidad de cerdos por hectárea, señal de un efecto inducido por las granjas porcinas.

Por lo que concierne a los sistemas de tratamiento instalados en las granjas visitadas, cabe señalar que fueron diseñados bajo la NOM-001-SEMARNAT-1996 (Riego). No obstante, se encontró que las remociones de DBO5 son superiores al 95%, bajo esa condición de la NOM, nitrógeno y fósforo no tienen límite máximo permisible establecido.

Sólo dos de los sistemas instalados tuvieron coliformes fecales menores que 2000 NMP/100 mL (NOM-001-SEMARNAT-1996).

En cuanto al cumplimiento de la NOM-001-SEMARNAT-2021 se tiene lo siguiente: todas las granjas cumplen para pH y temperatura; únicamente cinco sistemas cumplen para grasas y aceites; sólo dos cumplen para *E. Coli* y el efluente de una granja presenta una Toxicidad menor que 2 UT.

Todas las granjas exceden el límite permisible de DQO total, establecido en la NOM-001-SEMARNAT-2021, asimismo ocurre con la DQO soluble, el nitrógeno total y el fósforo total.

El diferencial entre DQO total y DQO soluble indica que se podría remover una cantidad muy importante de sustancias consumidoras de oxígeno mediante tratamiento fisicoquímico, pero no suficiente para satisfacer los criterios de la NOM-001-SEMARNAT-2021.

Todos los sistemas analizados requieren un pos-tratamiento para alcanzar concentraciones menores que los límites permisibles de la NOM-001-SEMARNAT-2021 para suelos cársticos. Los pos-tratamientos que se elijan deberán ser capaces de nitrificar-desnitrificar, o en su defecto deben ser capaces de asimilar el nitrógeno. Por ejemplo, en plantas de humedal, en la forma en que el nitrógeno se encuentre en el agua para que pueda ser removido de la corriente líquida. En caso de optar por sistemas naturales se requiere el permiso de SEMARNAT ya que implicaría desmontar parte de la cubierta arbórea de las zonas de reserva en las granjas.

En lo que respecta a los resultados del diagnóstico de aire y suelo, se llevó a cabo una primera aproximación sobre las concentraciones ambientales de contaminantes atmosféricos en tres granjas ubicadas en el estado de Yucatán, donde los contaminantes con mayor presencia y niveles importantes de concentraciones fueron: amoníaco y ácido sulfhídrico.

Respecto a las concentraciones de amoníaco, estas resultan mayores en comparación con los niveles ambientales reportados en la literatura científica, sin embargo, para el periodo de muestreo no se puede establecer si hay mayores concentraciones durante la temporada seca-caliente.

Los resultados obtenidos aun en condiciones atmosféricas de un Norte, donde las altas velocidades del viento diluyeron las concentraciones, se puede observar niveles importantes de amoníaco y ácido sulfhídrico, que en condiciones de humedad elevada como se presentan en la península y baja velocidad del viento; pueden favorecer las condiciones de humedad alta y depósito húmedo ácido en el territorio, afectando los suelos de la zona.





RECOMENDACIONES GENERALES

Con el objetivo de mitigar los impactos ambientales de la actividad porcícola en la calidad del agua del estado de Yucatán, se recomienda llevar a cabo un muestreo de agua subterránea dirigido a contaminación puntual, en las zonas de granjas porcícolas, midiendo parámetros químicos (aniones, cationes, pH, Redox, conductividad eléctrica, temperatura, oxígeno) y del nitrato medir isotopos estables.

En las muestras de agua subterránea de la red puntual, medir tritio ambiental con el objeto de determinar el tiempo de residencia de las aguas subterráneas.

Establecer una RED de medición de contaminación puntual, con el objetivo de medir la variación de nitratos, determinar la concentración de hidrógeno de los nitratos y conocer el origen de éstos.

Implementar medidas para la disminución de la contaminación difusa por nutrientes al agua subterránea, verificando el cumplimiento de las normas vigentes en materia de descargas a cuerpos receptores.

Implementar buenas prácticas en el manejo de fertilizantes en la actividad agrícola de la zona, así como la vigilancia de los generadores de descargas de la actividad pecuaria (porcina y avícola).

En caso de que el agua de los cenotes sea utilizada como fuente de abastecimiento público, es necesario garantizar el uso de un proceso de desinfección para evitar efectos adversos a la salud por la presencia de organismos patógenos (E. Coli). Así como realizar análisis de todos los parámetros que se establecen en la NOM-127-SSA1 2021.

En las instalaciones actuales es conveniente desazolver las lagunas facultativas y, en aquellas que tienen una geometría que asemeje más a un cuadrado que a un rectángulo con relación 2:1 instalar mamparas para evitar cortos circuitos y maximizar el tiempo de residencia hidráulico dentro de la laguna. Esto no será suficiente para alcanzar los LP, pero permitirá que el o los sistemas de postratamiento puedan trabajar con mayor holgura.

Los postratamientos que se instalen pueden ser sistemas naturales, como humedales, pero deben diseñarse minuciosamente, ya que para lograr tanto el control de nitrógeno, como de fósforo es probable que tenga que ser una secuencia de humedales

diferentes, por ejemplo, de flujo vertical seguido de flujo subsuperficial.

Los sistemas de postratamiento también pueden ser del tipo biológico mecanizado, y se deben diseñar para el control de nitrógeno y fósforo. En estos casos tiene que ocurrir una nitrificación y posteriormente la desnitrificación.

En lo que concierne a la calidad del aire, es importante desarrollar un plan de manejo integral de las emisiones de gases contaminantes y metano en las zonas de granjas, los resultados muestran presencia de los contaminantes mencionados y se debe establecer una hoja de ruta con los tres órdenes de gobierno para reducir la emisión de estos gases.

Se recomienda establecer un plan de monitoreo comunitario de amoniaco y ácido sulfhídrico en las comunidades cercanas a las granjas, ya que éstas, son las fuentes más importantes que generan estos contaminantes y las poblaciones aledañas son receptoras de estos contaminantes.

De igual manera se recomienda el estudio del impacto de las emisiones de las granjas porcícolas en la actividad apícola en la región.

Las empresas porcícolas deben desarrollar programas de monitoreo y establecer una ruta de mitigación tecnológica integral adecuada para estos contaminantes, que incluya al metano.

Los metales y las sales encontradas en los suelos muestreados en las tres granjas están directamente relacionados con la actividad porcina, de acuerdo con la literatura, por lo que el uso de aspersores para la dispersión de los efluentes no es adecuado para la protección del ambiente y la salud de la población.

Para ello es importante que los tres órdenes de gobierno puedan crear un programa de vigilancia y seguimiento de las concentraciones ambientales para alertar a la población y reducir su exposición a estos contaminantes.

Por su parte, a partir del diagnóstico de suelo, se recomienda realizar monitoreos periódicos de coliformes, nitratos, nitritos, fosfatos, que pueden ser indicativos de una adición de elementos provenientes de estas descargas de materia orgánica a los suelos.





Se recomienda evaluar presencia de hormonas y antibióticos tanto en suelos como en cuerpos de agua donde se realizan las descargas de la materia orgánica. Se recomienda ampliar las mediciones de sales y metales pesados a otras zonas donde se identifique la existencia de la actividad porcícola para dimensionar los impactos en la vegetación y en la calidad del suelo.

Los suelos de la zona peninsular suelen ser delgados y pedregosos, estos leptosoles van de los 5 a los 25 cm de espesor, con muy poca retención, por lo

que, sería importante realizar una evaluación de presencia de hormonas o derivados, así como de antibióticos, tanto en suelos como en agua, esto es de suma importancia para evaluar la posible farmacoresistencia presentada por los microorganismos y que podría ser un problema de salud importante.





LÍMITES DE SUSTENTABILIDAD A LA INDUSTRIA PORCINA DE YUCATÁN

La principal preocupación ambiental por la presencia de las granjas porcinas en el estado de Yucatán, es la contaminación del acuífero kárstico, que es una de las riquezas hidrológicas más importantes de México.

Como se ha presentado, las granjas porcícolas generan desechos que, sumado a otros factores, contaminan el acuífero y con ello, las fuentes de abastecimiento de agua para personas e industrias. Por esta razón, controlar esta actividad de la mano del cuidado de la calidad del agua del acuífero, es de suma importancia. Las excretas animales son la principal fuente de contaminación de esta industria hacia el acuífero. Por lo tanto, la protección de la calidad del agua del acuífero de Yucatán, requiere atención a descargas de granjas porcinas de todo tipo.

En diversos países del mundo, las nuevas políticas públicas desarrolladas para permitir el desarrollo de actividades económicas que generan residuos, como las granjas de cerdos, están enfocadas en definir límites de contaminación con énfasis en el contenido de nitrógeno y fósforo en las excretas de los animales (Ruddy *et al* 2006; DEFRA 2007). De hecho, ya desde hace años la cantidad de nitrógeno y fósforo en los cuerpos de agua ha sido definido como uno de las nueve fronteras planetarias a las que debemos dar atención para caminar hacia un mundo sustentable (Rockström *et al.* 2009). Para este propósito, el concepto de huella hídrica gris y nivel de contaminación del agua son indispensables.

Huella hídrica gris asociada a los cerdos

De acuerdo con Mekonnen y Hoekstra (2016) es posible definir las cargas antropogénicas de nitrógeno y fósforo al medio ambiente a través del concepto de huella hídrica gris, a saber:

$$HHGris = \frac{\text{Carga}}{(C_{\max} - C_{\text{nat}})}$$

Donde la carga representa en kg/año el nitrógeno generado en las excretas de los cerdos. Mientras que $C_{\text{nat}}=1.5\text{mg/l}$ y representa las concentraciones naturales de nitrógeno medidas en el acuífero de Yucatán en zonas con baja presencia humana (estimado este valor a partir de un muestreo de 20 cenotes).

Para el nitrógeno, la carga en kgN/año, se define según DEFRA (2007) en 18kg de nitrógeno al año por cerdo. Está documentado que las excretas de cerdo contienen (entre otros): nitrógeno, fósforo y potasio, sin embargo el que contiene la mayor carga contaminante justamente el nitrógeno, por lo que el planteamiento de huella hídrica gris en este trabajo, se construye con información relativa a este contaminante.

Al no existir escurrimiento superficial en Yucatán, se utiliza el valor de recarga como variable de flujo para el acuífero, de esta manera es posible definir el Nivel de Contaminación del Agua (NCA) con la siguiente ecuación:

$$NCA = \frac{HHGris}{R_{\text{unitaria_Municipal}}}$$

Dónde $R_{\text{unitaria_Municipal}}$ representa la recarga por Municipio en el estado de Yucatán. De acuerdo con datos oficiales, la recarga anual del acuífero es de 21,813 Hm³/año, si consideramos que el acuífero tiene una superficie de 124,409 km², la recarga unitaria es de $R_{\text{unitaria}} = 175,336 \text{ m}^3/\text{km}^2$, al multiplicar este valor unitario, por el área de cada municipio en kilómetros tendremos la $R_{\text{unitaria_Municipal}}$, con lo que es posible determinar la capacidad de renovación del agua a nivel municipal.

De esta manera, si $NCA > 1$ se identifica una condición de no sustentabilidad del agua, en virtud de que se rebasa la capacidad de renovación del agua en el acuífero acumulándose contaminación y degradando la calidad del agua.

Para la determinación del nivel de contaminación del agua a nivel municipal, es necesario definir también un valor de concentración máxima de



nitrógeno en el acuífero y los cenotes del estado (C_{max} en la ecuación de huella hídrica gris). En este sentido, Liu *et al.* (2012) propusieron un valor de $C_{max} = 3.0$ mg/l que corresponde al doble de la concentración natural definida en este estudio.

Si utilizamos este valor de concentración máxima, se tienen los resultados que se presentan en la Figura 53, donde se aprecian con colores verde y amarillo aquellos municipios con actividad porcina sustentable, mientras que en colores naranja y rojo aquellos municipios donde la actividad porcina rebasa y por mucho la capacidad de renovación del agua en el acuífero.

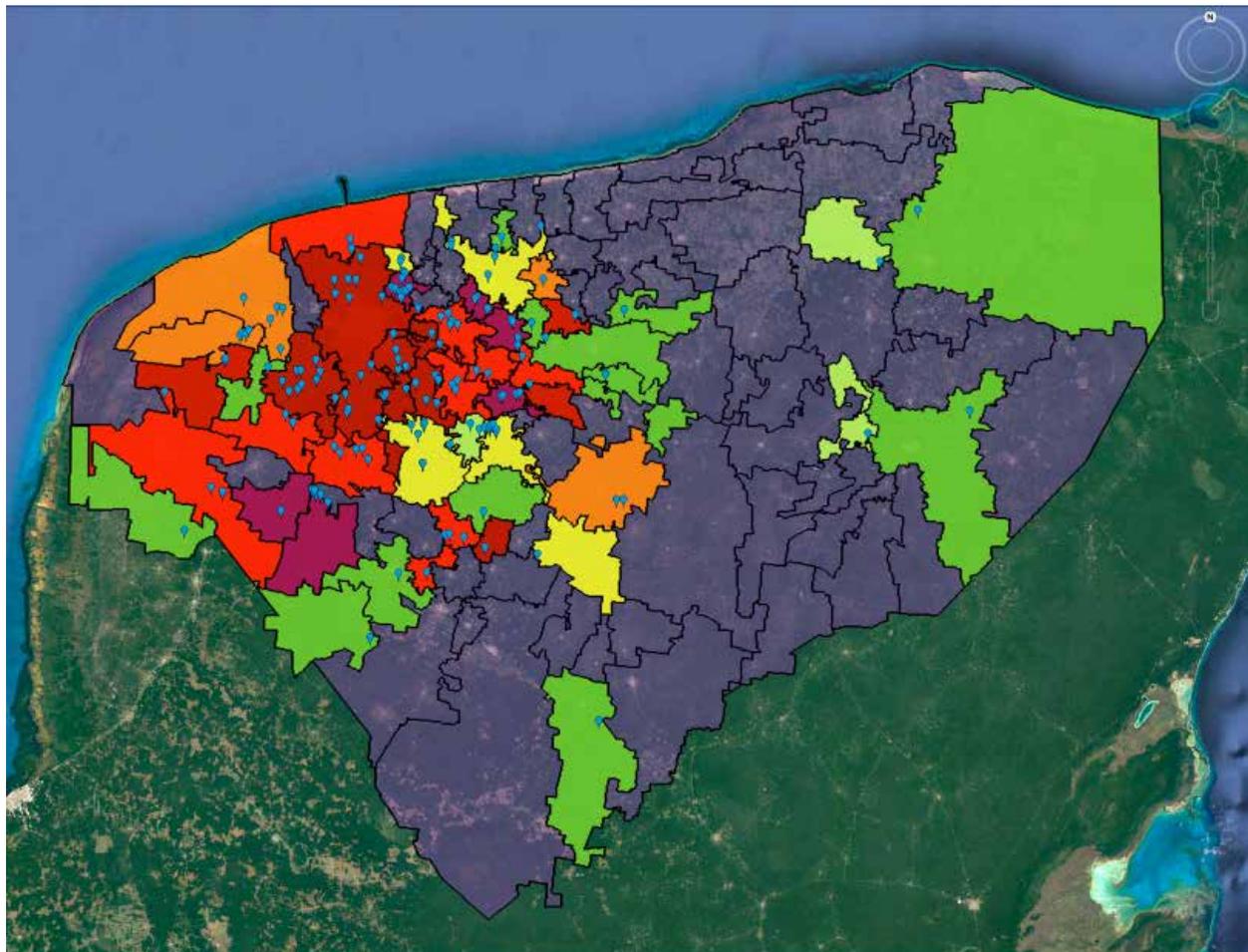
Considerando estos valores umbrales, se aplicó esta metodología en 51 municipios donde se detectó actividad de la industria porcina. De esta manera, es posible determinar en función del nivel de contaminación del agua (NCA) si es que existe

sustentabilidad hídrica a una escala municipal por parte de esta industria (cuando $NCA < 1.0$). Los resultados señalan que se tienen 26 municipios del estado (de una muestra de 51 que presentan actividad de esta industria) con condiciones críticas para la sustentabilidad hídrica del acuífero de Yucatán, es decir con $NCA > 2.0$.

Lo que señala con toda claridad que, es en estos 26 municipios donde la cantidad de nitrógeno generado por los cerdos registrados, rebasa en al menos dos veces la capacidad de renovación del agua, poniendo en riesgo a esta fuente de abastecimiento.

Asimismo, hay 4 municipios que determinan condiciones urgentes de atención con $2.0 < NCA < 1.0$ y 21 municipios donde el nivel de contaminación del agua, definido para esta industria, es menor a 1 y por tanto se puede clasificar a la industria dentro del rango sustentable.

Figura 53. Nivel de contaminación del agua considerando para el nitrógeno una $C_{max} = 3.0$ mg/l inducido por la industria porcina en el estado de Yucatán (pines azules representan la ubicación de granjas porcinas en el estado)

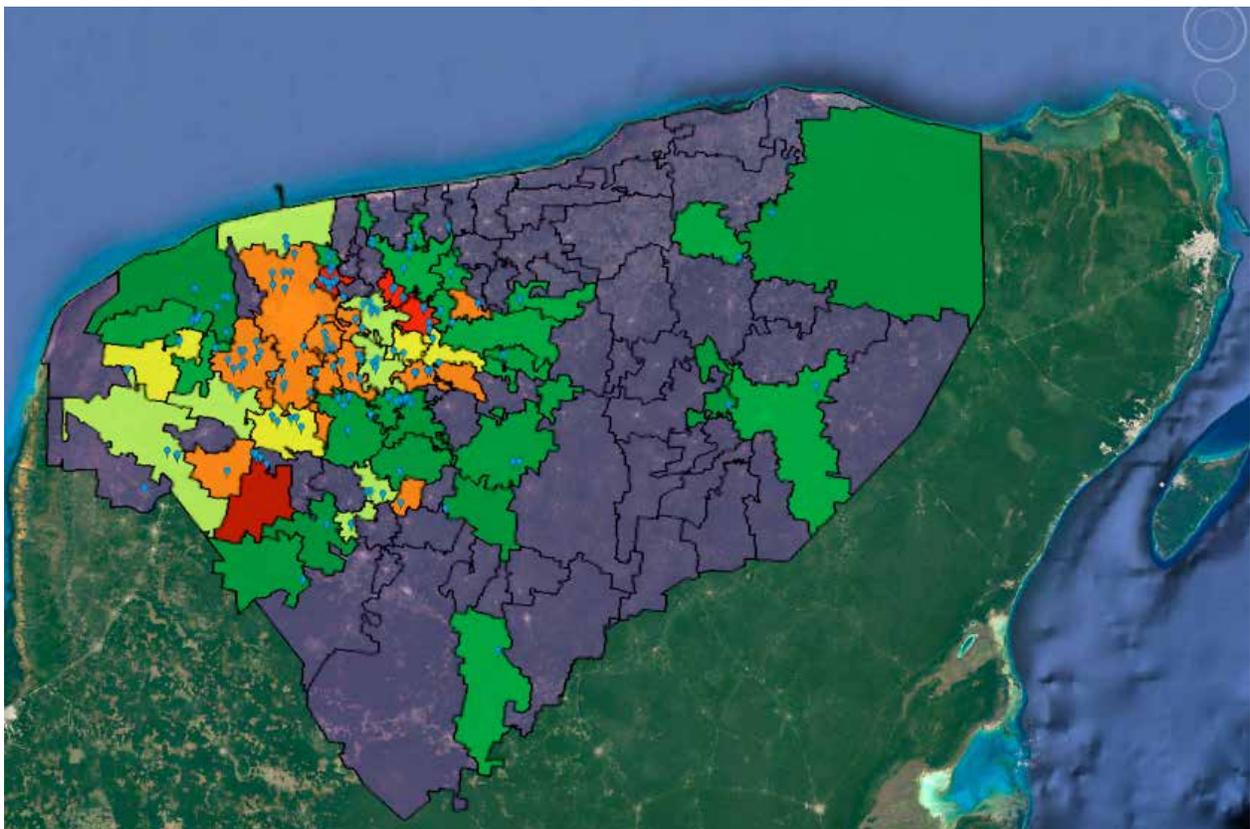


	NCA	No. de municipios
	NCA > 10	6 Municipios
	10 > NCA > 5	10 Municipios
	5 > NCA > 2	10 Municipios
	2 > NCA > 1	4 Municipios
	1 > NCA > 0.5	5 Municipios
	0.5 > NCA > 0.3	3 Municipios
	NCA < 0.3	13 Municipios

En virtud de que existen más actividades pecuarias (ej. granjas avícolas) ocurriendo en el territorio, en este estudio se propone la utilización de un valor de $C_{max}=10\text{mg/l}$ (3 veces por encima del propuesto por Liu *et al.*, 2012) de tal manera que este valor ajustado, considera la aportación de nitrógeno al acuífero por la presencia de otras fuentes de contaminación.

Si utilizamos este nuevo valor de concentración máxima, se tienen los resultados que se presentan en la Figura 54, donde igualmente se aprecian con colores verde y amarillo aquellos municipios con actividad porcina sustentable, mientras que en colores naranja y rojo aquellos municipios donde la actividad porcina rebasa la capacidad de renovación del agua en el acuífero.

Figura 54. Nivel de contaminación del agua considerando para el nitrógeno una $C_{max}=10.0\text{ mg/l}$ inducido por la industria porcina en el estado de Yucatán (pines azules representan la ubicación de granjas porcinas en el estado)





Tal y como se aprecia en los resultados de la Figura 54, se observa un suavizado en los niveles de contaminación registrados en los 51 municipios analizados donde hay actividad de la industria porcina. A pesar de ello, es posible identificar municipios con un nivel de contaminación del agua ($NCA > 1$) que claramente indica la no sustentabilidad hídrica de esta actividad para el acuífero de Yucatán.

Los resultados señalan que se tienen 4 municipios del estado (de los 51 que se analizaron con actividad

de esta industria) con condiciones muy críticas para la sustentabilidad hídrica del acuífero de Yucatán, es decir con $NCA > 2.0$. Estos resultados señalan que para estos 4 municipios se debe suspender la emisión de permisos para la instalación de esta industria en el territorio, ya que rebasa en al menos dos veces la cantidad de nitrógeno que puede ser asimilada por el acuífero. Por otro lado se identifican 11 municipios con condiciones urgentes de atención con $2.0 < NCA < 1.0$ y 36 municipios dentro de los límites sustentables para esta actividad económica.

	NCA	No. de municipios
	$NCA > 10$	0 Municipios
	$10 > NCA > 5$	1 Municipios
	$5 > NCA > 2$	3 Municipios
	$2 > NCA > 1$	11 Municipios
	$1 > NCA > 0.5$	4 Municipios
	$0.5 > NCA > 0.3$	7 Municipios
	$NCA < 0.3$	25 Municipios

Umbrales para el desarrollo sustentable de la industria porcina

Una vez obtenidos los resultados a nivel municipal del nivel de contaminación del agua por la concentración de nitrógeno que resulta de la presencia de los cerdos, es posible identificar aquellos municipios donde se requiere una atención urgente y donde es posible permitir la actividad porcina sin ningún riesgo a la contaminación del acuífero.

Sin embargo, es muy importante definir un límite de sustentabilidad para la industria porcina en territorio, de tal suerte que sea posible la conservación del ambiente y la calidad del agua en aquellos municipios donde la actividad porcina es sustentable o todavía no está presente (Bai *et al.* 2015).

La pregunta clave estriba en cómo definir ese límite o qué valor podemos utilizar para su definición. Por ejemplo, en China, país de gran consumo y producción de carne de cerdo se comienza a utilizar el concepto de huella hídrica justamente para definir ese límite (Xie *et al.* 2020). Mientras que en países europeos como Países Bajos o Dinamarca, considerados como grandes exportadores de carne de cerdo la definición de estos límites es considerada

como urgente desde el punto de vista ambiental, estudios recientes proponen el uso del número de cerdos por hectárea a nivel municipal, es un parámetro importante a considerar (Willems *et al.* 2016; Bai *et al.* 2019).

De esta manera, en este diagnóstico se propone utilizar un par de parámetros que nos permiten identificar la sustentabilidad hídrica del municipio, asociada a una actividad porcina pujante, en función de variables hidrológicas con una base física e hidrológica.

Estos dos parámetros son, el número de cerdos por hectárea y el nivel de contaminación del agua presentado en la sección anterior.

Si calculamos para los municipios del estado de Yucatán, la densidad de Cerdos/ha y la relacionamos con el nivel de contaminación del agua estimado en la sección anterior, se tiene una relación entre ambos parámetros definido en la siguiente tabla:





Cerdos/ha	NCA
0.25	0.3
0.41	0.5
0.83	1
1.03	1.25
1.24	1.5
1.42	1.72
1.66	2
4.14	5
8.28	10

De esta manera, los límites sustentables para ambos parámetros Cerdos/ha y NCA, se definen de tal manera que no sobrepasemos la capacidad de renovación del agua en el acuífero, a saber $NCA < 1.1$ y $Cerdos/ha = 1.0$. En particular, para el caso del nivel de contaminación se considera hasta un 10% más de carga contaminante por nitrógeno, dado por un $NCA < 1.1$. Esto se debe a la dinámica rápida del acuífero de Yucatán, pues la velocidad de respuesta del acuífero a eventos de precipitación, junto con la velocidad del flujo subterráneo en las cavidades kársticas, permite considerar un 10% más de carga contaminante en el acuífero.

Si consideramos el parámetro de sustentabilidad definido por $Cerdos/ha = 1.0$, los resultados indican que en los municipios del estado de Yucatán con actividad porcícola se tienen:

- 12 Municipios con producción no sustentable, pues no cumplen con este límite de $Cerdos/ha = 1.0$
- 3 muy críticos con $Cerdos/ha > 2.0$
 - Muna (4.33)
 - Conkal (3.6)
 - Cacalchén (2.08)
- 9 de atención urgente $1.0 < Cerdos/ha < 2.0$
 - Muxupip (1.69)
 - Opichén (1.57)
 - Hocabá (1.47)
 - Acanceh (1.30)

Tekantó	(1.17)
Mérida	(1.14)
Xocchel	(1.12)
Tixpéhual	(1.10)
Kanasín	(1.07)

En estos 12 municipios se recomienda lo siguiente:

- Muna, Conkal y Cacalchén reducir densidad de cerdos por hectárea.
- No otorgar más permisos para instalación de granjas porcícolas.
- Verificar sistemas de tratamiento de aguas residuales de las granjas porcícolas.

Ahora bien, si consideramos el Nivel de Contaminación del Agua < 1.1 se tiene lo siguiente:

- 13 Municipios con producción no sustentable, pues no cumplen con el límite de $NCA < 1.1$
- 4 muy críticos con $NCA > 2.0$
 - Muna (5.23)
 - Conkal (4.35)
 - Cacalchén (2.52)
 - Muxupip (2.04)
- 9 de atención urgente $1.1 < NCA < 2.0$
 - Opichén (1.89)
 - Hocabá (1.78)





Acanceh	(1.58)
Tekantó	(1.42)
Mérida	(1.38)
Xocchel	(1.35)
Tixpéhual	(1.33)
Kanasín	(1.29)
Chumayel	(1.18)
*Timucuy	(1.06)
*Umán	(1.04)

De igual forma, en estos 13 municipios se recomienda lo siguiente:

- Muna, Conkal, Muxupip y Cacalchén: No otorgar más permisos para instalación de granjas porcícolas.
- Verificar que las granjas existentes tengan trenes de tratamiento adecuados (tamaño).
- Por otro lado, en los municipios de Mérida y Kanasín se recomienda no otorgar más permisos para la instalación de granjas, dada la alta densidad de población (>11 hab./ha.)
- Mientras que en Opichén, Hocabá, Acanceh, Tekantó, Xocchel, Tixpéhual y Chumayel: Mejorar sistemas de tratamiento de acuerdo al tamaño.





ANEXOS

Anexo 1. Parámetros de campo en Cenotes.

No.	Cenote	Conductividad Eléctrica ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	Temperatura ($^{\circ}\text{C}$)	Salinidad (ppt)*	Profundidad (m)
1	Ixcojil	952	26.33	0.47	2.1
2	El Altillo	1378	27.24	0.68	0.69
3	Xpuchil	1239	27.55	0.61	1.93
4	Calle 17	2477	27.57	1.27	1.71
5	Chen Ha (OCPYU4933N1)	1042	29.13	0.51	5.62
6	San Joaquin 1	--	--	--	--
7	San Joaquin 2	3092	29.01	1.6	1.71
8	Kankirixche	1906	27.68	0.96	2.47
9	Sacamucuy	2436	27.66	1.25	0.69
10	Sambula	1951	28.71	0.99	1.63
11	Pozo 1 (Ocpyu4973)	2916	27.27	1.51	28.07
12	Xelactun	2415	26.66	1.24	9.72
13	El Pocito (Hunucmá)	1438	28.05	0.72	0.88
14	Noc Ac	1620	28.01	0.81	4.08
15	Chen Ha (OCPYU4953W1))	2496	29.47	1.28	12.59
16	Polol (CPYU4950W1)	4738	30.3	2.52	0.6
17	Aktun-Ha	871	27.25	0.42	1.29
18	Xtojil	711	28.28	0.34	0.55
19	Yokdzonot	928	26.07	0.45	28.27
20	Chihuán	1191	27.23	0.59	3.31

*ppt: partes por millar o gr/L





Anexo 2. Valores de Nutrientes, Cenotes.

No.	CENOTE	FOSFATO TOTAL mg/L	FÓSFORO TOTAL mg/L	NITRÓGENO AMONIAICAL mg/L	NITRÓGENO DE NITRATOS mg/L	NITRÓGENO DE NITRITOS mg/L
1	Polol (CPYU4950W1)	0.159	0.052	0.188	0.109	< 0,0100
2	Kankirixche	0.223	0.073	0.059	3.24	< 0,0100
3	1 San Joaquín	0.309	0.101	0.3	0.101	< 0,0100
4	2 San Joaquín	0.184	0.06	0.159	< 0,100	< 0,0100
5	Sacamucoy	0.248	0.081	0.112	3.17	< 0,0100
6	Sambelá	0.171	0.056	0.118	3.6	< 0,0100
7	Chen Ha (OCPYU4953W1)	0.174	0.057	0.082	0.601	< 0,0100
8	Xelactún	0.514	0.168	0.642	0.641	< 0,0100
9	Pozo 1 (OCPYU4973)	0.196	0.064	0.636	< 0,100	< 0,0100
10	Hunacmá	0.187	0.061	0.1	7.21	< 0,0100
11	Haktun Ha	0.086	0.028	0.071	2.68	< 0,0100
12	Xpuchil	0.129	0.042	0.188	3.97	< 0,0100
13	Chen Ha (OCPYU4933N1)	0.456	0.149	0.218	0.321	0.0143
14	Noc Ac	< 0,046	<0.015	0.065	2.68	< 0,0100
15	Calle 17	0.364	0.119	0.029	3.36	< 0,0100
16	Ixcojil	0.193	0.063	0.212	3.08	< 0,0100
17	El Altillo	0.202	0.066	0.188	5.44	< 0,0100
18	X'tojil	0.468	0.153	1.8	0.604	0.4164
19	Yokdzonot	0.404	0.132	0.047	6.63	0.0113
20	Chihuán	0.165	0.054	0.029	5.01	< 0,0100
	Promedio	0.254	0.083	0.262	2.914	0.147
	Valor máximo	0.514	0.168	1.8	7.21	0.4164
	Valor mínimo	0.086	0.028	0.029	0.101	0.0113
	Desviación Estándar	0.135	0.044	0.401	2.280	0.093





Anexo 3. Valores de parámetros fisicoquímicos, Cenotes.

No.	CENOTE	CLORURO mg/L	*COLOR UPTCo	DBO mg/L	DQO mg/L	ION SULFATO	SDT mg/L	TURBIEDAD UNT
1	Polol	1066	3	1.7	72.4	319	3008	12
2	Kankirixche	297	2,5	< 1,0	< 5,00	198	1142	0.02
3	1 San Joaquín	1283	50	1.7	74	312	3390	2.5
4	2 San Joaquín	645	40	< 1,0	89.6	340	1886	6.2
5	Sacamucoy	508	2,5	< 1,0	14.3	102	1392	0.05
6	Sambelá	369	2,5	< 1,0	13.1	58	1054	0.3
7	Chen Ha (OCPYU4953W1)	497	2,5	< 1,0	16	185	1502	0.4
8	Xelactún	241	30	1.6	10.9	63.9	724	2.2
9	Pozo 1 (OCPYU4973)	174	20	2.3	14.7	59.3	598	0.55
10	Hunacmá	216	2,5	< 1,0	< 5,00	48.9	780	0.02
11	Haktun Ha	65.1	2.5	< 1,0	11.7	13.1	406	0.75
12	Xpuchil	170	2,5	1.7	11.7	31.1	664	0.9
13	Chen Ha (OCPYU4933N1)	146	13	1.7	14.8	36.1	562	0.4
14	Noc Ac	298	2,5	< 1,0	< 5,00	51.7	922	0.02
15	Calle 17	537	2,5	1.8	17.1	84	1300	0.02
16	Ixcojil	93.4	2,5	1.4	9.38	16.7	516	0.4
17	El Altillo	210	2,5	1.2	14.3	34.2	748	0.5
18	X'tojil	83.5	2,5	4	29.7	< 4,00	362	8.7
19	Yokdzonot	96.4	2,5	< 1,0	< 5,00	22.9	504	0.1
20	Chihuán	153	2,5	< 1,0	< 5,00	29.8	664	0.05
	Promedio	357.420	22.643	1.910	27.579	105.563	1106.2	1.804
	Valor máximo	1283	50	4	89.6	340	3390	12
	Valor mínimo	65.1	2.5	1.2	9.38	13.1	362	0.02
	Desviación Estándar	327.034	15.093	1.119	26.274	109.011	821.933	3.298

*Color verdadero





Anexo 4. Valores de minerales, Cenotes.

No.	CENOTE	FLUORUROS	CALCIO	MAGNESIO	POTASIO	SODIO
1	Polol	0.33	113.3	182.05	73.7	588.28
2	Kankirixche	0.495	135.85	62.43	6.25	165.39
3	1 San Joaquín	0.599	84.43	199.1	33.33	744.26
4	2 San Joaquín	0.418	100.93	110.55	24.09	365.64
5	Sacamucoy	0.501	118.53	69.03	10.54	271.59
6	Sambelá	0.384	106.98	58.08	7.88	200.04
7	Chen Ha (OCPYU4953W1)	0.451	121	75.9	10.93	265.54
8	Xelactún	0.331	84.7	29.15	10.16	125.75
9	Pozo 1 (OCPYU4973)	0.326	68.75	25.08	5.4	88.33
10	Hunacmá	0.387	104.23	33.77	7.68	119.31
11	Haktun Ha	0.305	92.95	36.63	1.85	34.02
12	Xpuchil	0.399	104.5	33.88	3.89	78.95
13	Chen Ha (OCPYU4933N1)	0.248	71.78	22.22	8.29	74.53
14	Noc Ac	0.227	92.13	37.29	8.14	163.35
15	Calle 17	0.389	125.13	53.24	13.16	288.92
16	Ixcojil	0.292	92.4	32.01	2.42	47.31
17	El Altillo	0.402	105.6	35.75	9.15	97.87
18	X'tojil	< 0,200	65.73	17.27	3.31	40.19
19	Yokdzonot	0.314	94.6	20.46	4.59	49.71
20	Chihuán	0.295	95.15	38.5	4.26	75.93
	Promedio	0.373	98.934	58.620	12.451	194.246
	Valor máximo	0.599	135.85	199.1	73.7	744.26
	Valor mínimo	0.227	65.73	17.27	1.85	34.02
	Desviación Estándar	0.123	18.666	50.474	16.241	188.251





Anexo 5. Valores de parámetros microbiológicos, Cenotes.

No.	CENOTE	COLIFORMES TOTALES (UFC)	ESCHERICHIA COLI (UFC)	ENTEROCOCOS FECALES (UFC)
1	Polol	4.61E+02	2.61E+02	*
2	Kankirixche	2.98E+04	1.26E+02	*
3	1 San Joaquín	*	*	1.34E+02
4	2 San Joaquín	*	*	1.40E+01
5	Sacamucoy	6.26E+03	2.70E+01	*
6	Sambelá	4.80E+02	2.90E+02	*
7	Chen Ha (OCPYU4953W1)	7.43E+02	2.30E+01	*
8	Xelactún	1.14E+04	6.36E+02	*
9	Pozo 1 (OCPYU4973)	2.00E+03	7.20E+01	*
10	Hunacmá	1.10E+03	5.00E+01	*
11	Haktun Ha	4.75E+03	1.70E+03	*
12	Xpuchil	6.55E+03	3.20E+03	*
13	Chen Ha (OCPYU4933N1)	3.61E+03	6.50E+01	*
14	Noc Ac	1.18E+03	5.00E+00	*
15	Calle 17	6.46E+03	1.82E+02	*
16	Ixcojil	6.46E+03	1.40E+02	*
17	El Altillo	7.54E+03	1.30E+03	*
No.	CENOTE	COLIFORMES TOTALES (UFC)	ESCHERICHIA COLI (UFC)	ENTEROCOCOS FECALES (UFC)
18	X'tojil	1.11E+05	3.50E+03	*
19	Yokdzonot	2.35E+02	1.55E+02	*
20	Chihuán	1.16E+02	8.00E+00	*
	Promedio	11119.167	652.222	74.000
	Valor máximo	111000	3500	134
	Valor mínimo	116	5	14
	Desviación Estándar	24710.710	1047.333	29.962





REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- En Alkezweeny, A.J., Laws, G.L., Jones, W., 1986. Aircraft and ground measurements of ammonia in Kentucky. *Atmospheric Environment* 20, 357–360.
- Andersen *et al.* (2015). Lab-assay for estimating methane emissions from deep-pit swine manure storages.
- Bai, Z.H., Ma, L., Qin, W., Chen, Q., Oenema, O., Zhang, F.S. 2015. Changes in Pig Production in China and Their Effects on Nitrogen and Phosphorus Use and Losses. *Environmental Science and Technology*.
- Bai, Z.H., Ma, W., Ma, L., Velthof, G.L., Wei, Z. Havlik, P., Oenema, O.Lee, M.R.F., Zhang, F.S. (2018) China's livestock transition: Driving Forces, impacts and consequences. *Science Advances*, 4, eaar8534.
- Bai, Z.H., Zhao, J., Wei, Z., Jin, X., MaL. (2019) Socioeconomic drivers of pig production and their effects on achieving sustainable development goals in China, *Journal of Integrative Environmental Sciences*, 16:1, 141-155, DOI: 10.1080/1943815X.2019.1671463.
- Diario Oficial del Gobierno del Estado de Yucatán (2013). Decreto que establece el Área Natural Protegida denominada Reserva Estatal Geohidrológica del Anillo de Cenotes. 28 de octubre de 2013. En https://www.yucatan.gob.mx/docs/diario_oficial/diarios/2013/2013-10-28_2.pdf
- DEFRA (2007) The protection of waters against pollution from agriculture Accessed Sept, 2022. DOI: 10.1007/s10661-017-5768-y
- Drucker, Adam G.; Escalante Semerena, Roberto; Verónica Gómez González y Sergio Magaña Rueda (2003). La industria porcina en Yucatán: Un análisis de la generación de aguas residuales. En *Revista Problemas del Desarrollo*, Vol. 34, No. 135, X – XII/2003 (fecha de aprobación: 4 marzo 2004)
- Escolero, O.A., Marín, L.E., Steinich, B., y Pacheco, J. (2000). Delimitation of a hydrogeological reserve for a city within a karstic aquifer: the Merida, Yucatán example. *Landscape and Urban Planning*. Vol. 51, pp 53-62. Graniel *et al.* 1999.
- FAO, (2020). Supply and Utilization Accounts of FAOSTAT, FAOSTAT Database, Food and Agriculture Organization, Rome, Italy, 2020 <http://faostat.fao.org>.
- Fenn, M.E., Poth, M.A., Aber, J.D., Baron, J.S., Bormann, B.T., Johnson, D.W., Lemly, A.D., McNulty, S.G., Ryan, D.F., Stottlemyer, R., 1998. Nitrogen excess in North American ecosystems: predisposing factors, ecosystem responses and management strategies. *Ecological Applications* 8, 706–733.
- Food and Water Watch. (2020). "Factory Farm Nation: 2020 Edition." Food & Water Watch, 12 May 2020, www.foodandwaterwatch.org/sites/default/files/ib_2004_updfacfarmmaps-web2.pdf.
- Geocomunes, Colectivo; Flores Adrián y Deniau Yannick. (2019). El megaproyecto para la península de Yucatán. México: GeoComunes / Consejo Civil Mexicano para la Silvicultura Sostenible. Recuperado de: Geovisualizador de la Península de Yucatán (geocomunes.org)
- Gerbens-Leenes, P.W., Nonhebel, S., Krol, M.S., (2010). Food consumption patterns and economic growth. Increasing affluence and the use of natural resources, *Appetite*, 55, 597–608.
- Greenpeace. (2020). Reporte La carne que está consumiendo al planeta. ¿Qué hay detrás de la industria porcícola en Yucatán? Recuperado de: https://www.greenpeace.org/static/planet4-mexico-stateless/2020/05/188dc911-reporte_granjas_webok3.pdf
- Grigg, D. (1995). The nutrition transition in Western Europe, *Journal of Historical Geography*, 22(1)247–261.
- Hoekstra, A. Y., Chapagain, A.K., Aldaya, M.M., Mekonnen, M.M. (2011). *The Water Footprint Assessment Manual: Setting the Global Standard*, Earthscan, London.
- Hoekstra, A.Y., Mekonnen, M.M. (2012). The water foot print of humanity, *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 109(9), 3232–3237.
- Houghton, J. T., L. G. Meira Filho, B. Lim, K. Treanton, I. Mamaty, Y. Bonduki, D.-J. Griggs, and B. A. Callender. 1996. IPCC Revised 1996 guidelines for national greenhouse gas inventories, Reference manual, Chapter 4- Agriculture. IPCC, Bracknell
- Hribar, C. (2010). Understanding Concentrated Animal Feeding Operations and Their Impact on Communities. Centers for Disease Control and Prevention, Centers for Disease Control and Prevention, www.cdc.gov/nceh/ehs/docs/understanding_cafos_nalboh.pdf



IMTA - Cardoso Vigueros L.M., Escalante Estrada V. E., Ramírez Camperos M. E., Tomasini Ortiz A.C. (2021) Guía para el tratamiento de las aguas residuales porcinas. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA) Recuperado de <https://www.gob.mx/imta/documentos/guia-para-el-tratamiento-de-las-aguas-residuales-porcinas>

J. Coma J. y Bonet J., (2004). "Producción ganadera y contaminación ambiental". XX Curso de Especialización FEDNA. Grupo Vall Companys. Barcelona (http://fundacionfedna.org/sites/default/files/04CAP_10.pdf).

Khalil, M. A. K. 2000. Atmospheric methane: an introduction. In: M. A. K. Khalil (ed.) Atmospheric methane: its role in the global environment. Springer-Verlag, Berlín.

Ley Federal de Derechos Disposiciones Aplicables en Materia de Aguas Nacionales (2022). Recuperado el 3 de marzo de 2023, de https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/723707/Ley_Federal_de_Derechos_2022.pdf.

Ley de Protección al Medio Ambiente del Estado de Yucatán, (2021). Recuperado de: <https://sds.yucatan.gob.mx/archivos/marco-juridico-publicaciones-oficiales/archivos/202211070685.pdf>.

Liu, J., Savenije, H.H.G., 2008. Food consumption patterns and their effect on water requirement in China, Hydrology and Earth System Sciences 12(3), 887–898.

Mekonnen y Hoekstra, (2016). Global grey water footprint and water pollution levels related to anthropogenic nitrogen loads to fresh water. Environmental Science and Technology.

National Cancer Institute, (2020). Nitrate, Implications for feed supply, manure recycling and production costs

Norma Mexicana NMX-AA-014-1980 "CUERPOS RECEPTORES.- MUESTREO". (S/f). Gob.mx. Recuperado el 3 de marzo de 2023, de <https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/166769/NMX-AA-014-1980.pdf>.

Norma Mexicana NMX-AA-3-1980 "AGUAS RESIDUALES.- MUESTREO". (S/f). Gob.mx. Recuperado el 3 de marzo de 2023, de <https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/166762/NMX-AA-003-1980.pdf>.

Norma Oficial Mexicana NOM-001-SEMARNAT-1996, que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en aguas y bienes nacionales. Nom-, N-001-S.-1996 N.-002-S.-1996. (s/f). Normas Oficiales Mexicanas. Gob.mx. Recuperado el 3 de marzo de

2023, de <http://www.conagua.gob.mx/conagua07/publicaciones/publicaciones/sgaa-15-13.pdf>.

Norma Oficial Mexicana NOM-001-SEMARNAT-2021 Que establece los límites permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en cuerpos receptores propiedad de la nación. DOF - Diario Oficial de la Federación. (s/f). Gob.mx. Recuperado el 3 de marzo de 2023, de https://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5645374&fecha=11/03/2022.

OCDE (2019) Exámenes de mercado en México. Estudio de caso del mercado de la carne de cerdo. Recuperado de <https://www.oecd.org/daf/competition/market-examinations-mexico-pork-meat-market-web-esp.pdf>

Paredes, D., Kusch, P., Mbwette, T. S. A., Stange, F., Müller, R. A., & Köser, H. (2007). New aspects of microbial nitrogen transformations in the context of wastewater treatment – A review. Engineering in Life Sciences, 7(1), 13–25. <https://doi.org/10.1002/elsc.200620170>

PIC-LATAM. Análisis de la industria porcina en Latinoamérica. Trimestre 4, 2020. Recuperado de https://latam.pic.com/wp-content/uploads/sites/19/2019/06/Analisis-de-la-Industria-Porcina-en-Latinoamerica_T4-2020.pdf

Popkin, B.M. 2002. The dynamics of the dietary transition in the developing world, in: B. Caballero, B.M. Popkin (Eds.)

Reglamento de la Ley de Protección al Medio Ambiente del Estado de Yucatán, (2021). Recuperado de: <https://sds.yucatan.gob.mx/archivos/marco-juridico-publicaciones-oficiales/archivos/202211080503.pdf>

Ruddy, B.C., D.L. Lorenz, and D.K. Mueller. 2006. County-level estimates of nutrient inputs to the land surface of the conterminous United States, 1982–2001: U.S. Geological Survey Scientific Investigations Report 2006-5012.

Servicio De Información Agroalimentaria Y Pesquera (SIAP) Panorama Agroalimentario 2021. Recuperado de: https://nube.siap.gob.mx/gobmx_publicaciones_siap/pag/2021/Panorama-Agroalimentario-2021

Servicio De Información Agroalimentaria Y Pesquera (SIAP) Panorama Agroalimentario 2020. Recuperado de <https://www.inforural.com.mx/wp-content/uploads/2020/11/Atlas-Agroalimentario-2020.pdf>

SIAP (2018) Yucatán Infografía Agroalimentaria 2018. Recuperado de: https://nube.siap.gob.mx/gobmx_publicaciones_siap/pag/2018/Yucatan-Infografia-Agroalimentaria-2018





SIAP. 2022. Información sobre el número de animales que se crían en el país con fines de producción. Disponible en: https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/744955/Inventario_2021_porcino.pdf

Willems, J., van Grinsven, H.J.M., Jacobsen, B.H. Jensen, T., Dalgaard, T., Westhoek, H., Silleback Krinstensen I., 2016. Why Danish pig farms have far more land and pigs than Dutch farms? *Agricultural Systems*, 144, 122-132.

Xie D., Zhuo, L., xie, P., Liu, Y., Feng, B., Wu, P. 2020. Spatiotemporal variations and developments of waterfootprints of pig feeding and pork production in China (2004-2013). *Agriculture, Ecosystems and Environment*. 297, 106932.

Yang, Q., *et al.* (2016). Corrigendum to 'Spatiotemporal Patterns of Livestock Manure Nutrient Production in the Conterminous United States from 1930 to 2012', *Science of the Total Environment* Vol.541, pp. 1592-1602, doi:10.1016/j.scitotenv.2015.12.066.



Dictamen Diagnóstico Ambiental de la actividad porcícola en Yucatán en su versión digital se terminó de editar en marzo de 2023. El diseño editorial se realizó por parte de la Coordinación General de Comunicación Social de la Semarnat.

El contenido es responsabilidad de los autores.

DICTAMEN DIAGNÓSTICO AMBIENTAL

*De la Actividad Porcícola
en Yucatán*

Marzo 2023



GOBIERNO DE
MÉXICO

MEDIO AMBIENTE
SECRETARÍA DE MEDIO AMBIENTE Y RECURSOS NATURALES



INECC
INSTITUTO NACIONAL
DE ECOLOGÍA Y
CAMBIO CLIMÁTICO