

GUÍA

PARA EL TRATAMIENTO
de las aguas residuales

PORCINAS

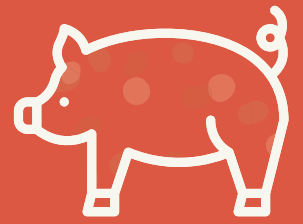
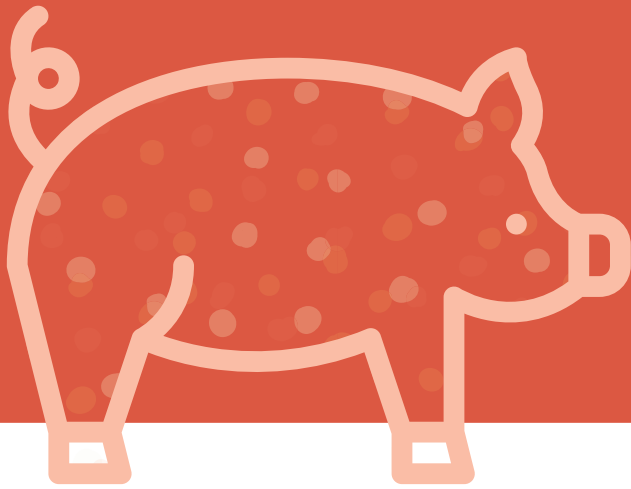
<https://doi.org/10.24850/b-imta-2021-01>



MEDIO AMBIENTE
SECRETARÍA DE MEDIO AMBIENTE Y RECURSOS NATURALES



IMTA
INSTITUTO MEXICANO
DE TECNOLOGÍA DEL AGUA



GUÍA

PARA EL TRATAMIENTO de las aguas residuales

PORCINAS

Coordinadores editoriales

Adrián Pedrozo Acuña

Norma Ramírez Salinas

Compilador

César Guillermo Calderón Mólgora

Autores

Lina María Cardoso Vigueros

Violeta Eréndira Escalante Estrada

Mercedes Esperanza Ramírez Camperos,

Ana Cecilia Tomasini Ortiz



MEDIO AMBIENTE

SECRETARÍA DE MEDIO AMBIENTE Y RECURSOS NATURALES



IMTA

INSTITUTO MEXICANO
DE TECNOLOGÍA DEL AGUA

Guía para el tratamiento de las aguas residuales porcinas

<https://doi.org/10.24850/b-imta-2021-01>

D.R. © 2021, Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales
Av. Ejército Nacional 223 Col. Anáhuac 11320 Ciudad de México

Instituto Mexicano de Tecnología del Agua
Blvd. Paseo Cuauhnáhuac 8532, Progreso,
62550 Jiutepec, Mor., México

Coordinación de Tratamiento y Calidad del Agua
Subcoordinación de Tratamiento de Aguas Residuales

Cuidado de edición: Emilio García Díaz

Coordinación gráfica, diseño y formación:
Marianella Espinosa Lara.
Diseño infográfico: Cinthya Berenice Uribe Osorio y
César Plácido Malvaez. Diseño de gráficas: Mitzi Alejandra Estrada
Román y Adolfo Remigio Armillas. Diseño de tablas: Paola Olmedo
Lara y Valeria Richter Soriano. Retoque fotográfico
Gloria Mary Carmen Ríos Beltrán.

Impreso en México / *Printed in Mexico*

Distribución Gratuita. Prohibida su venta.

Queda prohibido su uso para fines distintos al desarrollo social.

Se autoriza la reproducción sin alteraciones del material
contenido en esta obra, sin fines de lucro y citando la fuente.

CONTENIDO

PRESENTACIÓN DE LA SECRETARÍA DE MEDIO AMBIENTE Y DE RECURSOS NATURALES	IX
PRÓLOGO DEL SUBSECRETARIO DE FOMENTO Y NORMATIVIDAD AMBIENTAL	XI
MENSAJE DEL DIRECTOR GENERAL DEL IMTA	XIII
1 INTRODUCCIÓN	XIV
2 SITUACIÓN ACTUAL Y PERSPECTIVAS DEL SECTOR PORCINO EN LA PENÍNSULA DE YUCATÁN.....	2
3 IMPACTOS AMBIENTALES DE LA PRODUCCIÓN PORCINA.....	6
4 CARACTERIZACIÓN DE EXCRETAS PORCINAS	12
5 RECOLECCIÓN Y CONDUCCIÓN DE EXCRETAS.....	16
5.1 Sistemas de producción porcina en cama profunda.....	16
5.2 Sistemas de producción de cerdos a campo	18
5.3 Sistemas de producción porcina confinados.....	22
6 SISTEMA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES	26
6.1 Procesos anaerobios	28
6.1.1 Fosas o tanques sépticos.....	28
6.1.2 Reactor anaerobio de flujo ascendente.....	29
6.1.3 Digestión anaerobia	30
6.1.4 Biodigestores.....	32
6.1.4.1 Biodigestor de campana flotante o tipo hindú	32
6.1.4.2 Biodigestor de cúpula fija o tipo chino	33
6.1.4.3 Biodigestores de tipo tubular.....	34
6.1.5 Lechos de secado.....	37
6.2 Lagunas de tratamiento.....	37
6.2.1 Lagunas de estabilización.....	37
7 COMPOSTEO Y VERMICOMPOSTEO DE EXCRETAS PORCINAS	42
7.1 Composteo.....	42
7.1.1 Pilas alargadas o camellones.....	42
7.1.2 Pilas estáticas.....	43
7.1.3 Composteo en capas.....	44
7.2 Vermicomposteo.....	46
7.2.1 Sistemas de producción	47
7.2.2 Tipos de vermicomposteo.....	47
7.3 Métodos y análisis sugeridos para la composta y vermicomposta	48
7.4 Almacenamiento de compostas y vermicompostas.....	50
7.5 Diferentes usos de las compostas y vermicompostas.....	50
8 APROVECHAMIENTO AGRONÓMICO DE EFLUENTES Y RESIDUOS SÓLIDOS PORCINOS.....	54
8.1 Condiciones óptimas de uso agronómico.....	54
8.2 Normatividad vigente en México y otros países	54
8.3 Buenas prácticas de manejo y utilización de efluentes y residuos sólidos porcinos.....	55
8.3.1 Protección de ambientes riparios.....	56
8.3.2 Franjas de filtro vegetal o buffers	56
8.3.2.1 Profundidad del acuífero.....	57

8.3.2.2	Distancia de los sitios de aplicación a aguas superficiales.....	57
8.3.2.3	Distancia a pozos.....	57
8.3.2.4	Planicies de inundación.....	58
8.3.2.5	Proximidad a áreas recreativas.....	58
8.4	Porcentajes agronómicos.....	58
8.4.1	Nitrógeno y fósforo.....	58
8.4.2	Aplicación de acuerdo con la concentración máxima de contaminantes.....	60
8.5	Recomendaciones generales para la aplicación de agua y residuos sólidos porcícolas.....	60
9 MUESTREO DE EFLUENTES LÍQUIDOS Y SÓLIDOS		62
10 DIMENSIONAMIENTO DE SISTEMAS DE TRATAMIENTO PARA AGUAS RESIDUALES PORCINAS.....		66
10.1	Criterios para el dimensionamiento de digestores anaerobios para granjas porcinas.....	66
10.1.1	Consideraciones técnicas para el dimensionamiento de digestores anaerobios.....	67
10.1.1.1	Determinación del sustrato y características.....	67
10.1.1.2	Aspectos geográficos.....	68
10.1.1.3	Tiempo de retención hidráulico (TRH).....	68
10.1.1.4	Carga orgánica volumétrica.....	69
10.1.1.5	Volumen del digestor.....	70
10.1.1.6	Volumen de biogás.....	70
10.1.2	Estimación del volumen y del área requerida para la construcción de digestores tipo laguna cubierta (DLC).....	71
10.1.2.1	Estimación del volumen del digestor tipo laguna cubierta (DLC) para granjas de 1,000, 5,000 y 10,000 cerdos.....	72
10.1.2.2	Estimación del área requerida para la construcción de digestores tipo laguna cubierta (DLC).....	74
10.1.3	Estimación del volumen y área requerida para digestores completamente mezclados (DCM).....	78
10.2	Estimación del dimensionamiento de un sistema de tratamiento por lagunas de estabilización.....	81
10.2.1	Ejemplos del caso uno.....	81
10.2.2	Ejemplos del caso dos.....	83
10.2.3.1	Estimaciones de caudales y de las características de las ARP.....	83
10.2.3.2	Estimación de las áreas de sistemas lagunares en el tratamiento de aguas residuales porcinas.....	83
10.2.3.3	Ejemplos del dimensionamiento de un sistema lagunar.....	88
10.3	Estimación de áreas para sistemas lagunares como postratamiento de digestores anaerobios en el tratamiento de aguas residuales porcinas.....	91
10.3.1	Ejemplos del dimensionamiento de un sistema lagunar como postratamiento.....	91
11 COMPOSTEO DE LOS RESIDUOS SÓLIDOS		98
11.1	Modelo 1.-Granja de traspatio para el manejo de residuos sólidos (10 cerdos en crecimiento-engorda, 70 kg de peso promedio).....	98
11.2	Modelo 2.-Bloques continuos de vermicomposteo para el manejo de excretas porcinas en traspatio (10 cerdos en crecimiento engorda, 70 kg de peso en promedio).....	102
ANEXO 1		108
ANEXO 2		112
BIBLIOGRAFÍA.....		137

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1.	Localización de las granjas porcícolas en la península de Yucatán.....	2
Figura 2.2.	Vulnerabilidad a la contaminación por el factor kárstico (A), el factor edáfico (B) y el factor climático (C)	4
Figura 3.1.	Emisiones de gases de efecto invernadero producidas por el sector pecuario en México.....	6
Figura 3.2.	Emisiones globales de las cadenas de suministro, por categoría de suministro	6
Figura 3.3.	Tamaño, uso de suelo y vegetación de las granjas porcícolas de Yucatán.....	7
Figura 3.4.	Densidad de contaminación porcina de los municipios de Yucatán.....	10
Figura 3.5.	Vulnerabilidad a la contaminación del acuífero contra población porcina	10
Figura 4.1.	Relación entre el número de animales y la concentración de parámetros	12
Figura 4.2.	Relación entre el número de animales y la concentración de coliformes fecales	13
Figura 5.1.	Sistema de producción porcina en cama profunda	16
Figura 5.2.	Sistemas de producción porcina a campo.....	19
Figura 5.3.	Sistemas de producción porcina confinados.....	22
Figura 5.4.	Ejemplos de conducción y tratamiento de efluentes porcinos.....	23
Figura 6.1.	Ejemplos de rejillas y desarenadores para el tratamiento de aguas residuales.....	27
Figura 6.2.	Fosa o tanque séptico de un compartimiento	28
Figura 6.3.	Fosa o tanque séptico de dos compartimientos.....	29
Figura 6.4.	RAFA de geometría circular	30
Figura 6.5.	Digestor anaerobio de lodos.....	31
Figura 6.6.	Manejo y aprovechamiento de recursos en granjas y establos	32
Figura 6.7.	Biodigestor de campana flotante.....	33
Figura 6.8.	Biodigestor de cúpula china.....	34
Figura 6.9.	Biodigestores de tipo tubular	35
Figura 6.10.	Laguna de estabilización	38
Figura 6.11.	Laguna anaerobia	38
Figura 6.12.	Laguna de maduración, estructura de salida.....	39
Figura 7.1.	Pilas alargadas o camellones	42
Figura 7.2.	Pilas de composta estáticas o de aireación forzada.....	43
Figura 7.3.	Pila de composteo y monitoreo de temperaturas	44
Figura 7.4.	Pilas Estáticas.....	44
Figura 7.5.	Composteo en capas.....	45
Figura 7.7.	Papel de la lombriz en el vermicomposteo	46
Figura 7.6.	Compostera municipal en San Salvador.....	46
Figura 7.8.	Vermicompostera para residuos porcinos en Jojutla, Mor.	47
Figura 7.9.	Sistema de vermicomposteo, Nicolás de Ibarra, Jal.	48
Figura 7.10.	Implementos necesarios para comercialización.....	51
Figura 7.11.	Usos de las compostas y vermicompostas.....	51
Figura 7.12.	Áreas requeridas para el composteo y vermicomposteo	52
Figura 8.1.	Franjas de filtro vegetal o <i>buffers</i> , Universidad del Estado de Ohio.....	56
Figura 8.2.	Áreas recreativas.....	58
Figura 10.1.	Esquema del digestor tipo laguna cubierta para tratamiento de desechos de granjas y establos	72
Figura 10.2.	Concentraciones de DQO y SSV a la entrada y salida del DLM.....	74

Figura 10.3.	Componentes de un biodigestor tipo laguna cubierta (DLC).....	76
Figura 10.4.	Vista superior y transversal del DLC y componentes del sistema de tratamiento.....	77
Figura 10.5.	Componentes del sistema de tratamiento para un digestor completamente mezclado (DCM).....	80
Figura 10.6.	Diagrama de flujo del ejemplo de un sistema lagunar.....	82
Figura 10.7.	Diagrama de flujo del ejemplo de un sistema lagunar.....	90
Figura 10.8.	Tren de tratamiento de la opción uno, caso 1 de este apartado, incluyendo los tratamientos previos.	93
Figura 10.9.	Tren de tratamiento de la opción dos, caso 1 de este apartado; incluyendo los tratamientos previos.	94
Figura 10.10.	Tren de tratamiento de la opción tres, caso 1 de este apartado, incluyendo los tratamientos previos.	94
Figura 10.11.	Tren de tratamiento de la opción uno, caso 2 de este apartado, incluyendo los tratamientos previos.	94
Figura 10.12.	Tren de tratamiento de la opción dos, caso 2 de este apartado, incluyendo los tratamientos previos.	94
Figura 11.1.	Pila de composteo en paralelepípedo.....	99
Figura 11.2.	Pila alargada o camellón.....	99
Figura 11.3.	Herramientas para el composteo.	101
Figura 11.4.	Otras formas de composteo.....	102
Figura 11.5.	Sistema de bloques continuos para procesar excretas porcinas.	103
Figura 11.6.	Sistema de bloques para el tratamiento de residuos porcinos.....	104
Figura 11.7.	Abono empacado en bolsas de 2 kg y lombrices	105
Figura A.1.	Muestreo en descargas libres.	115
Figura A.2.	Medición volumétrica manual en descargas libres.....	116
Figura A.3.	Molinete.....	118
Figura A.4.	Ejemplo de etiqueta.....	120
Figura A.5.	Preservación de muestras.....	121
Figura A.6.	Material de muestreo.....	121
Figura A.7.	Ejemplo de Plan de Muestreo.	127
Figura A.8.	Ejemplo de un registro de campo.	129
Figura A.9.	Bitácora de campo.....	131

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1.	Información pública pecuaria, hídrica y manifiesto de impacto ambiental (MIA) de las granjas porcícolas de la península de Yucatán.	3
Tabla 3.1.	Cantidad anual de gases de efecto invernadero generados por las ... granjas porcícolas en la península de Yucatán.....	7
Tabla 3.3.	Número y tipo de granjas porcícolas establecidas en la península de Yucatán.....	8
Tabla 3.2.	Cambio de la vegetación forestal en los diferentes estados de la península de Yucatán.....	8
Tabla 3.4.	Resultados de los muestreos para la norma NOM-001-SEMARNAT.1996	9
Tabla 4.1.	Variación de la concentración de DQO.....	13
Tabla 6.1.	Materiales para la construcción de un biodigestor plástico	36
Tabla 6.2.	Parámetros de control en lagunas de estabilización (Rango normal).....	40
Tabla 7.1.	Parámetros y técnicas de análisis para compostas	48
Tabla 7.2.	Parámetros y técnicas de análisis para compostas.....	49

Tabla 8.1.	Normas vigentes mexicanas aplicables a los residuos sólidos y efluentes porcícolas.....	55
Tabla 8.2.	Porcentajes de pendientes para la aplicación de lodo residual.....	57
Tabla 10.1.	Características del purín de cerdo	66
Tabla 10.2.	Características de las aguas residuales porcinas de granjas de engorda.....	68
Tabla 10.3.	Datos iniciales de caudal para la estimación del dimensionamiento de digestores anaerobios.....	68
Tabla 10.4.	Relación entre temperatura y TRH recomendado para digestores sin calentamiento.....	69
Tabla 10.5.	Producción de biogás por cerdo de 70 kg.....	71
Tabla 10.6.	Estimación del volumen del DLC para granjas de 1,000, 5,000 y 10,000 cerdos.	72
Tabla 10.8.	Concentraciones del influente y efluente después del tratamiento.....	73
Tabla 10.7.	Estimación de la producción de biogás para granjas de 1,000, 5,000 y 10,000 cerdos.	73
Tabla 10.9.	Digestores tipo lagunas cubiertas requeridos para granjas de 1,000, 5,000 y 10,000 cerdos.	75
Tabla 10.11.	Concentraciones del influente y efluente después del tratamiento.	78
Tabla 10.13.	Volumen del DCM para granjas de 1,000, 5,000 y 10,000 cerdos.....	79
Tabla 10.12.	Producción de biogás en el DCM.	79
Tabla 10.14.	Áreas requeridas en digestores completamente mezclados (DCM) a diferentes profundidades.....	80
Tabla 10.15.	Datos utilizados para la estimación del dimensionamiento de los sistemas lagunares.....	81
Tabla 10.16.	Resultado del ejemplo uno.....	82
Tabla 10.17.	Resultado del ejemplo dos.	82
Tabla 10.18.	Caudal de aguas residuales porcinas.	84
Tabla 10.19.	Caudal de aguas residuales porcinas según fuente.....	84
Tabla 10.20.	Caudal de aguas residuales porcinas según fuente.....	84
Tabla 10.21.	Características de las aguas residuales porcinas según fuente.....	85
Tabla 10.22.	Granjas de engorda.....	85
Tabla 10.23.	Granjas pequeñas.	85
Tabla 10.24.	Granjas medianas.....	86
Tabla 10.25.	Granjas grandes.....	87
Tabla 10.26.	Datos iniciales para la estimación del área de un sistema lagunar.....	88
Tabla 10.29.	Resultado del ejemplo dos, caudal estimado para una población de 100 cerdos.....	89
Tabla 10.28.	Resultado del ejemplo uno, caudal estimado para una población de 50 cerdos.	89
Tabla 10.27.	Datos para la estimación del área de los sistemas lagunares.....	89
Tabla 10.30.	Resultado del ejemplo tres, caudal estimado para una población de 500 cerdos.	90
Tabla 10.31.	Datos para la estimación del área de los sistemas lagunares.....	92
Tabla 10.33.	Opciones del postratamiento (por lagunas de estabilización) del efluente del digestor anaerobio completamente mezclado (DCM) para granjas de 1,000 cerdos, caso dos de este apartado.....	93
Tabla 10.32.	Opciones del postratamiento (por lagunas de estabilización) del efluente del digestor tipo laguna cubierta (DLC) para granjas de 1,000 cerdos, caso uno de este apartado.....	93
Tabla A.1.	Frecuencia de muestreo.....	113
Tabla A.2.	Ejemplo de cálculo de muestra compuesta.....	114
Tabla A.3.	Frecuencia de muestreo y análisis y de reporte de efluentes no municipales.....	115
Tabla A.4.	Ecuaciones según el tipo de vertedero.....	117
Tabla A.5.	Tiempo de almacenamiento, preservación y volumen de muestra.....	122
Tabla A.6.	Frecuencia de muestreo y análisis para lodos y biosólidos.....	132
Tabla A.7.	Recipientes, volúmen, preservación y tiempo de análisis.....	135

PRESENTACIÓN



Los cambios repentinos detonados por el acelerado desarrollo económico mundial han impuesto una fuerte presión sobre nuestro planeta, lo cual ha resultado en desequilibrios del ciclo hidrológico global, que hoy se manifiestan en sobreexplotación de ríos y acuíferos, contaminación de los cuerpos de agua y pérdidas irreversibles en la biodiversidad, así como degradación de ecosistemas terrestres y acuáticos.

La contaminación del agua afecta la salud humana, el ambiente y el bienestar económico de todas las naciones. Por ello, su política pública es uno de los problemas ambientales más difíciles de manejar y requiere atención sobre las descargas de aguas residuales de industrias que producen sustancias tóxicas.

Este reto, común a todas las naciones del planeta, es muy complejo, dado que requiere la evolución de las prácticas de tratamiento establecidas. En el caso de la península de Yucatán, que se caracteriza por ser una región con alta disponibilidad de agua subterránea y con suelos kársticos altamente permeables, hemos visto el crecimiento de la industria porcícola, la cual genera aguas residuales que deben tratarse de forma adecuada para salvaguardar la integridad del agua subterránea de la que dependen los ecosistemas y la economía.

En este sentido, la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales de México impulsó la elaboración de la presente Guía, la cual tiene como base el mejor conocimiento disponible en el mundo. Su objetivo es apoyar a la industria porcícola en el diseño de un tren de tratamiento adecuado, según el tamaño de granja, que permita conservar la calidad del agua del acuífero de Yucatán. Adicionalmente, se incorporan instrucciones para el muestreo de calidad del agua de la descarga.

Esta acción es un imperativo ético, impulsado desde la Semarnat, para hacer del agua el elemento de desarrollo económico equitativo y bienestar social. El presente documento provee las herramientas necesarias para garantizar la actividad económica, y el cuidado del medio ambiente. De esta forma se garantiza el bienestar social y económico de las comunidades locales, así como la sustentabilidad de uno de los acuíferos más importantes de México.

Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales
María Luisa Albores González

PRÓLOGO



El consumo de carne porcícola comenzó en México con la conquista. Fue un negocio que controló en su momento Hernán Cortés y que desde entonces ha sido motivo de controversias respecto a su regulación. En nuestro país el consumo es principalmente nacional y solo en Yucatán la exportación es relevante, siendo éste uno de los principales estados productores a nivel nacional y el primero en el sureste mexicano.

Esta guía preparada por el IMTA, constituye una herramienta para el tratamiento de las aguas residuales producto de la actividad porcícola, dirigida a productores o a quien busque una referencia completa y de fácil acceso, la cual aprovecha recursos sencillos como un cuestionario práctico que permite aterrizar el tratamiento del tema.

Estamos seguros de la utilidad y potencial que representa este instrumento, ya que su aplicación tiene enormes beneficios ambientales al reducir posibles impactos a los ecosistemas y recursos naturales asociados a la actividad. Por eso, esperamos que su uso sea extensivo y sus alcances se reflejen en todo el territorio nacional, especialmente en la península de Yucatán donde se encuentran grandes oportunidades de implementación, por el volumen de la producción local y las características de su suelo y agua.

Subsecretario de Fomento y Normatividad Ambiental
Tonatiuh Herrera Gutiérrez

MENSAJE



El presente trabajo tiene como propósito dotar a la industria porcícola yucateca de una guía para el tratamiento adecuado de las aguas residuales derivadas de su actividad económica. Se trata de un ejercicio basado en la ciencia que representa un imperativo ético, dada la importancia del acuífero en el estado de Yucatán.

El Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA), como la inteligencia hídrica del Gobierno de México, provee estos conocimientos en el entendido de que la socialización de estos trenes de tratamiento permiten construir una industria capaz de generar riqueza de forma ambiental e hídricamente responsable. Esto allanará el camino hacia la construcción de un ecosistema de cooperación entre la industria y el gobierno para hacer del agua el motor del desarrollo equitativo de México, construyendo acuerdos que beneficien a toda la sociedad.

**Director General del Instituto Mexicano
de Tecnología del Agua**
Adrián Pedrozo Acuña

INTRODUCCIÓN



1

1 INTRODUCCIÓN

Yucatán es el quinto estado más importante de la república en la cría de cerdos (Montero, 2015) y, por sus características ambientales, territoriales y socioeconómicas, es muy competitivo en este rubro dentro y fuera del país. Sin embargo, las granjas porcícolas son la causa de graves problemas ambientales, como la contaminación del agua subterránea (Drucker *et al.*, 2007; Cheng *et al.*, 2020); la contaminación de la atmósfera (Radon *et al.*, 2007; Wing *et al.*, 2008; Loftus *et al.*, 2015); la degradación del suelo (Aguilar *et al.*, 2011); e incluso daños a la salud humana (Borlée *et al.*, 2015; Smit *et al.*, 2017), pues cada año se reportan en la entidad nuevos casos de influenza porcina (causada por el virus AH1N1) (Secretaría de Salud, 2018).

La manera en que se lleva a cabo actualmente esta actividad primaria, ya sea en su forma extensiva o intensiva, conlleva diversos cuestionamientos en cuanto a los daños ambientales que ocasiona en el entorno, pues la ganadería extensiva tiene como consecuencia inmediata la deforestación, la erosión y empobrecimiento del suelo, mientras que la de carácter intensivo tiene fuertes impactos contaminantes (Pérez-Espejo, 2006). Ambas modalidades redundan en la pérdida de servicios ambientales y contribuyen al cambio climático por la emisión de gases de efecto invernadero. No obstante, mediante un manejo adecuado de las excretas se pueden mitigar las emisiones de estos gases y se pueden generar subproductos de utilidad ambiental y económica.

Con el fin de contribuir al correcto manejo de la ganadería porcícola es que se presenta esta *Guía para el tratamiento de las aguas residuales porcinas*, cuya cabal aplicación requiere la respuesta minuciosa al cuestionario que se anexa a la misma.



SITUACIÓN ACTUAL Y PERSPECTIVAS

DEL SECTOR PORCINO
en la península de Yucatán



2

2 SITUACIÓN ACTUAL Y PERSPECTIVAS DEL SECTOR PORCINO EN LA PENÍNSULA DE YUCATÁN

Existen evidencias del gran crecimiento de la industria porcícola en la península de Yucatán; situación que contribuye a la afectación del aire, suelo y agua de una de las zonas con mayor riqueza natural en el país y que ha exacerbado los riesgos de extinción y la pérdida de biodiversidad en la región.

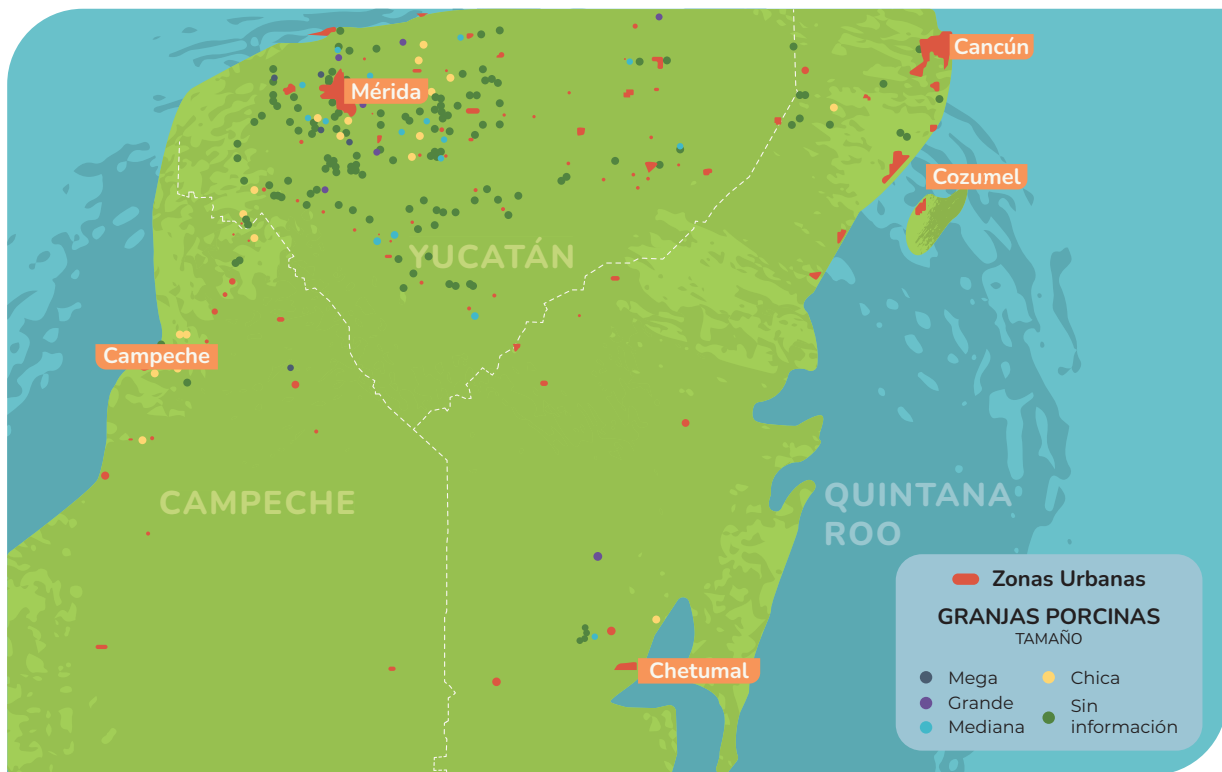
La selva maya de la península de Yucatán es un reservorio de biodiversidad asombroso: protege el suelo contra la erosión al acumular materia orgánica y evita tanto el arrastre de sustratos como el azolve en otros sitios; genera agua para el consumo humano y para riego; suministra oxígeno y capta dióxido de carbono, lo que mitiga el calentamiento global, y aporta recursos vegetales y animales aprovechables, como alimentos, medicinas y servicios ambientales.

En esta península se encuentra el principal sumidero de carbono del país, así como la reserva hidrológica de aguas subterráneas más importante en el territorio nacional, ya que alberga cuatro acuíferos con una recarga media de 25,316 hm³, más del 32 % de la recarga media de todo el país (Segura, et al., 2005).

Actualmente, en la península de Yucatán se encuentra el 14.2 % de las granjas porcícolas identificadas en la república mexicana, y Yucatán provee 9 % de la producción nacional. Los números indican que la producción local va en aumento, ya que esta industria crece a una tasa del 4.5 % anual, un porcentaje incluso mayor que el de Sonora y Jalisco (2.6 y 1.7 %, respectivamente), principales productores de carne de cerdo en México (OCDE, 2019).

Por otra parte, la producción porcina, vista a partir del número de animales sacrificados en la península de Yucatán, fue de 1,875,890 cerdos en 2018: el 93 % corresponde a Yucatán, el 4 % a Campeche y solo 3 % a Quintana Roo (figura 2.1). Durante el periodo 2006-2018, la producción porcina de la península aumentó en 36 % y, de nuevo, el mayor dinamismo lo tuvo Yucatán, cuyo crecimiento fue del 39 %, frente al 10 y 9 % de Campeche y Quintana Roo, respectivamente

Figura 2.1. Localización de las granjas porcícolas en la península de Yucatán (Greenpeace, 2020).



(SIAP, 2017). Dentro del estado de Yucatán la mayor parte de las granjas porcícolas se ubican en los municipios aledaños a la ciudad de Mérida (SIAP, 2017; RMGIR, 2015; Geo Comunes y Consejo Civil Mexicano para la Silvicultura Sostenible, A.C., 2019; Repda, 2019; Semarnat, 2019).

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 demanda química de oxígeno (DQO) y 25 kg de demanda bioquímica de oxígeno a 5 días (DBO₅), por lo que, si no se dispone adecuadamente de él, en vez de elementos fertilizantes, se tienen elementos contaminantes. Con el objeto de establecer una comparación, los 8,361.68 m³/d de purines que se generan en las granjas porcícolas de Yucatán representan una carga orgánica medida como DQO de 392,999 kg/d, equivalente a 785,998 m³/d de aguas residuales domésticas, considerando la DQO de estas últimas con un valor de 500 mg/l. Si se considera, además, que se generan 200 l/hab./d, la contaminación por descargas en granjas porcícolas (con base en la DQO) resulta equi-

valente a la generada por las aguas residuales de 3,929,990 personas. Si además se toma en cuenta la carga orgánica generada por cerdos de patio, los valores ascienden a: 443,133.39 kg de DQO/d, que corresponden a 886,266.78 m³/d de aguas residuales domésticas y a la carga generada cada día por 4, 431,334 habitantes.

Los datos públicos disponibles en fuentes gubernamentales, como el Registro Público de Derechos de Agua (Repda), el Registro de Emisiones y Transferencia de Contaminantes (RETC), la *Gaceta ecológica de la Semarnat* y el Sistema de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP), presentan inconsistencias y omisiones graves. Ninguna de estas fuentes muestra información transparente, fidedigna y amigable para el público. Órganos administrativos, como el (SIAP), la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (Semarnat) y la Comisión Nacional del Agua (Conagua), deberían tener un registro claro y ordenado de esta información (Semarnat, 2017 y 2019). En la tabla 2.1 se muestra la relación de granjas identificadas y la información disponible sobre ellas.

Tabla 2.1. Información pública pecuaria, hídrica y manifiesto de impacto ambiental (MIA) de las granjas porcícolas de la península de Yucatán.

Entidad	Total de granjas identificadas	Con información sobre agua	Con información pecuaria	Con MIA
Campeche	12	7	7	4
Quintana Roo	21	13	6	0
Yucatán	222	84	143	18
Total	257	104	156	22

Las expectativas de crecimiento de esta industria constituyen una amenaza para el medio ambiente y las comunidades de la región, pues al duplicarse la producción, también se duplica la deforestación, la contaminación del agua, la emisión de GEI, el ruido y el mal olor.

El crecimiento acelerado de la industria porcícola en la península de Yucatán tiene muchas implicaciones negativas, no solo relevantes en el ámbito local, sino nacional e incluso internacional. Se perjudica a una región de suma importancia para México (*Diario oficial del estado de Yucatán*, 2013).

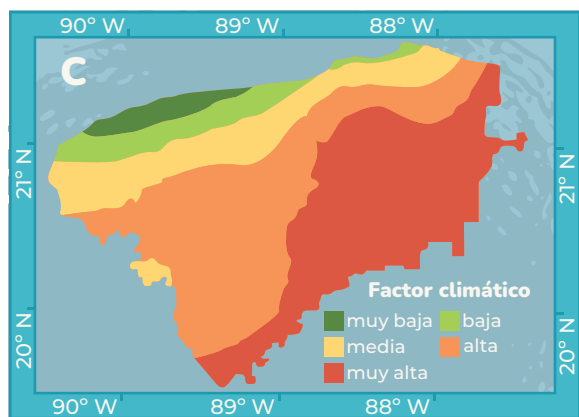
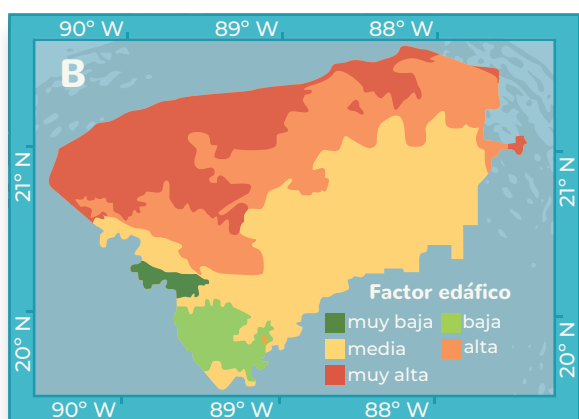
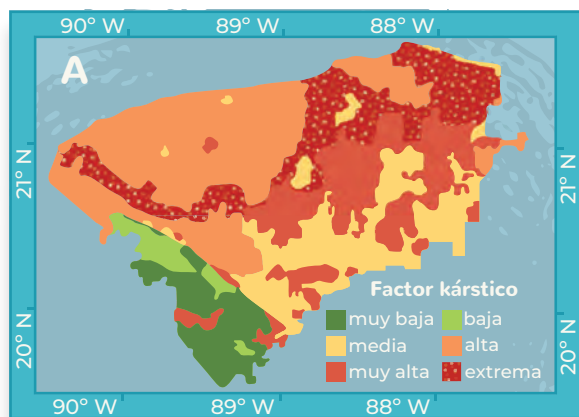


Figura 2.2. Vulnerabilidad a la contaminación por el factor kárstico (A), el factor edáfico (B) y el factor climático (C), (Aguilar-Duarte et al, 2016).

Los mapas de vulnerabilidad del factor kárstico (figura 2.2) y edáfico presentan similitudes en los patrones de vulnerabilidad, principalmente en las planicies, que van de mayor a menor de las regiones noroeste hacia sureste; sin embargo, el factor kárstico refleja la existencia del anillo de cenotes que continúa con una extensa zona en el noreste (vulnerabilidad extrema) y el campo de dolinas en el este (nivel muy alto) a diferencia del factor edáfico donde este patrón no es evidente. La superficie del nivel medio de vulnerabilidad es mayor en el mapa del factor edáfico (40 %) debido al efecto de la presencia de cambisoles y luvisoles en depresiones como las úvalas y poljés, que se presentan en esta zona. En el mapa del factor kárstico, la superficie del nivel medio es menor (16 %), debido al efecto de la densidad de depresiones en gran parte de la zona este (Duarte et al, 2016).

Considerando únicamente los atributos del relieve, el sur del estado presenta niveles bajos y muy bajos de vulnerabilidad, que suman el 12 % de la superficie estatal. Esto es debido a que en estas zonas se presenta baja densidad de depresiones de tipo úvalas y poljés, principalmente (figura 2.2). En el mapa del factor edáfico, el sur es ligeramente diferente, pues aún se observan zonas de vulnerabilidad media, debido a la presencia de los leptosoles en las asociaciones edáficas que disminuyen ligeramente el índice de aptitud total por asociación edáfica. De acuerdo con el mapa del factor edáfico, en la zona sur se tienen áreas de baja y muy baja vulnerabilidad, con un total del 6 % de la superficie estatal, por la presencia de suelos más profundos y arcillosos, como los luvisoles, vertisoles y estagnosoles (Duarte et al, 2016).

El factor climático presenta un patrón inverso a los factores kárstico y de suelo, las áreas con muy baja, baja y media vulnerabilidad se ubican en los extremos noroeste y parte del centro de Yucatán, y las zonas con mayor vulnerabilidad, desde el centro hacia el sureste y la costa noreste, cerca de los límites con Quintana Roo. Al igual que los factores kárstico y de suelo, en el factor clima, los niveles bajos y muy bajos siguen presentando los menores porcentajes de la superficie estatal (Duarte et al, 2016).



IMPACTOS AMBIENTALES

de la producción porcina



3

3 IMPACTOS AMBIENTALES DE LA PRODUCCIÓN PORCINA

Los sistemas de producción pecuaria son la causa del 15 % de las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) en el país (figura 3.1), y son los ganados bovino y porcino las principales fuentes de los mismos (Inecc, 2018). En las cadenas de suministro porcino, las emisiones provienen principalmente de la producción de alimento y, secundariamente, del manejo de estiércol.

De acuerdo con el Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (Inifap) (Domínguez *et al.*, 2014), los cerdos no absorben la totalidad de los nutrientes que consumen y excretan de 45 a 60 % de nitrógeno (N), de 50 a 80 % de calcio (Ca) y fósforo (P), y de 70 a 95 % de potasio (K), sodio (Na), magnesio (Mg), cobre (Cu), zinc (Zn), manganeso (Mn) y hierro (Fe). Estos residuos son altamente contaminantes para los cuerpos receptores (agua, aire y suelo). El exceso de nitrógeno puede contaminar el suelo y el agua y dar lugar a la producción de óxido nitroso (N₂O), un gas de efecto invernadero que se libera en el aire a partir del estiércol.

El nitrógeno excretado por la orina se halla principalmente en forma de urea, la cual se convierte con facilidad en amoníaco (NH₃) y dióxido de carbono (CO₂) por la enzima ureasa presente en las heces.

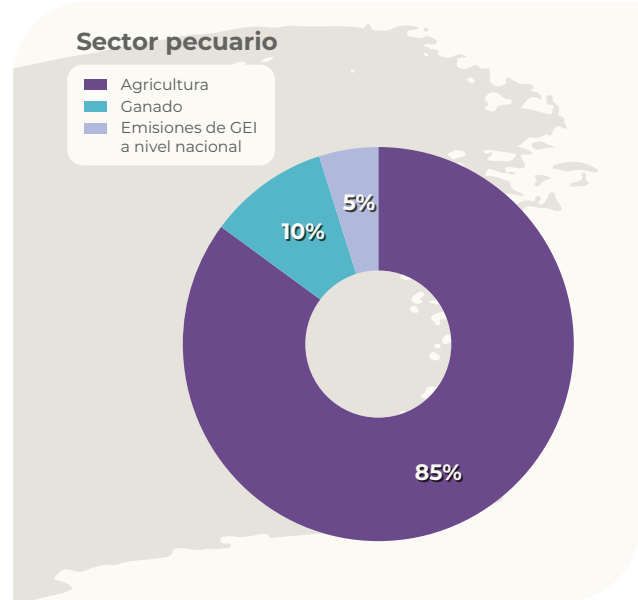


Figura 3.1. Emisiones de gases de efecto invernadero producidas por el sector pecuario en México (Greenpeace, 2020).

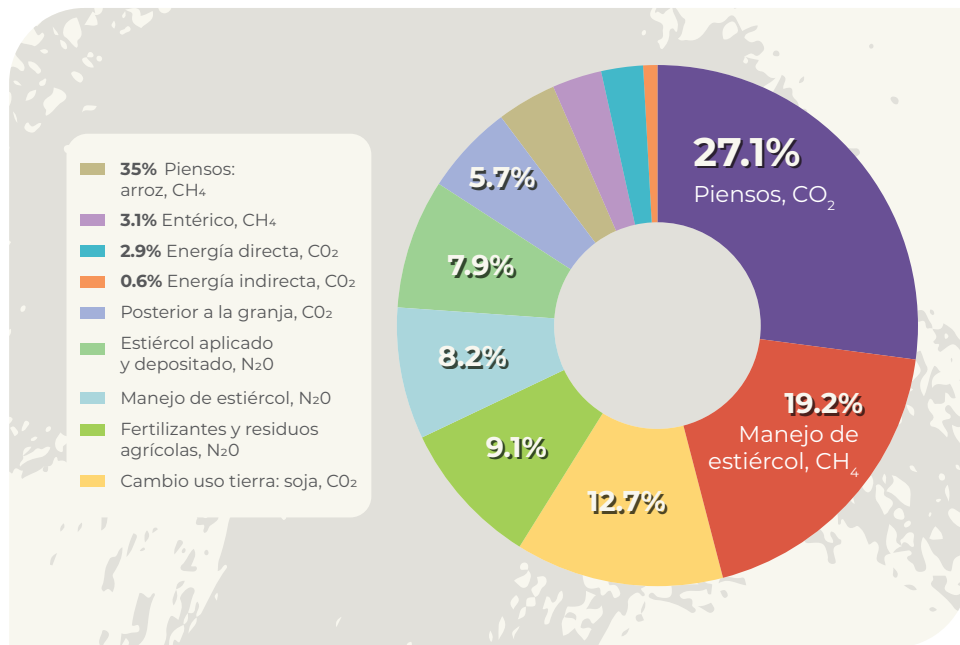


Figura 3.2. Emisiones globales de las cadenas de suministro, por categoría de suministro (Greenpeace, 2020).

Con la información de las directrices del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC, por sus siglas en inglés) y el acuerdo de metodologías para calcular los GEI, se estimó el escenario de emisiones para cada granja porcícola en la península de Yucatán, con el dato del total de la población de cerdos. Los resultados se resumen en la Tabla 3.1.

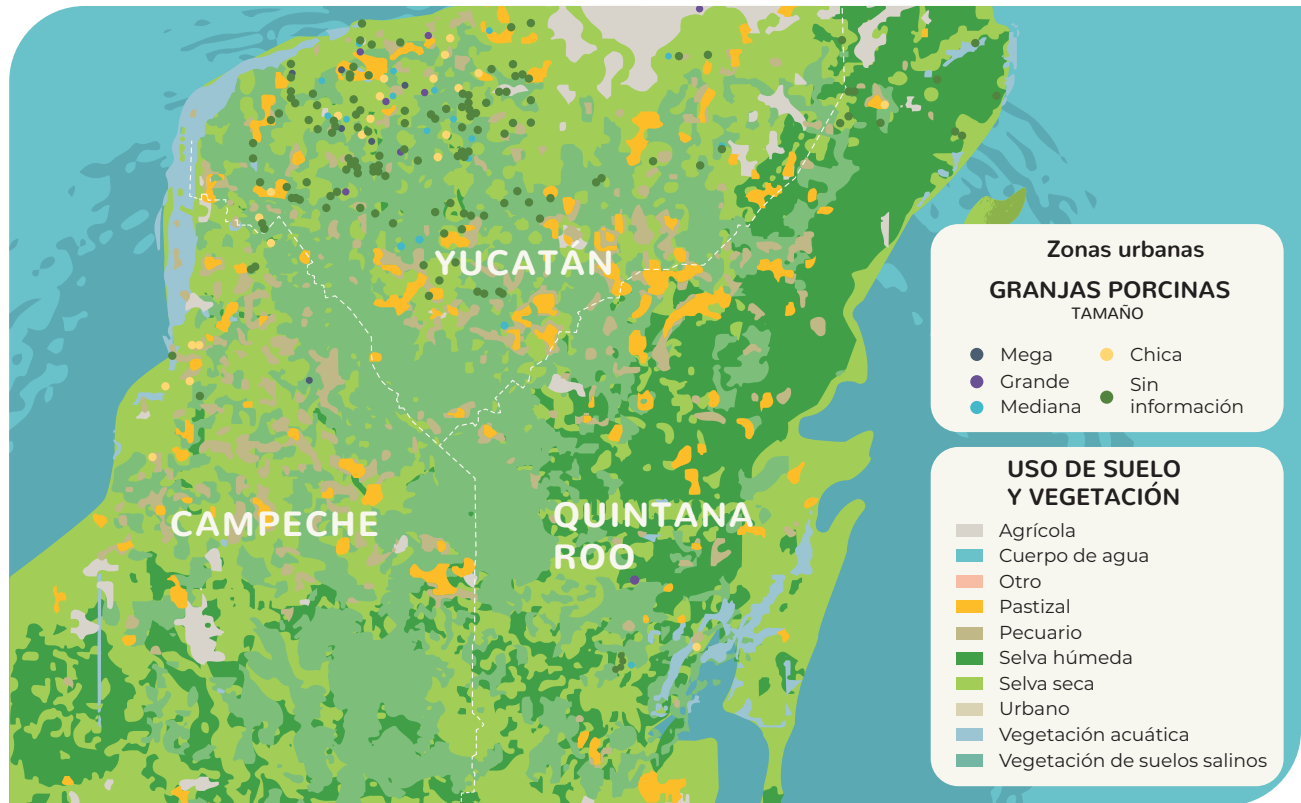
Tabla 3.1. Cantidad anual de gases de efecto invernadero generados por las granjas porcícolas en la península de Yucatán.

Entidad	CO ₂ e (t)	CH ₄ (t)	N ₂ O (t)
Yucatán	12,464,611.52	12,615.15	45,703.32

Las granjas porcícolas industriales emplean grandes cantidades de agua. Para producir 1 kg de cerdo se requieren cerca de 6,000 l de agua y 3.5 kg de grano para alimentarlo, lo cual hace que la porcicultura sea una actividad que atenta contra el bienestar de los animales, el ambiente, la biodiversidad y la calidad de vida de las comunidades

cercanas, además de potenciar los efectos negativos del cambio climático. (Greenpeace, 2020). En la península de Yucatán, 45 % de estas actividades se desarrollan sobre la selva seca, 31 % de su superficie actual ocupada por las granjas ha sido deforestada, y 10,997.01 hectáreas de selva han sido potencialmente deforestadas.

Figura 3.3. Tamaño, uso de suelo y vegetación de las granjas porcícolas de Yucatán (Greenpeace, 2020).



Se analizaron las dinámicas de la vegetación observadas en la región respecto a la Carta de Uso de Suelo y Vegetación Serie II (1994) y la Carta de Uso de Suelo y Vegetación Serie VI (2017), ambas del Inegi. De este análisis se desprende que 31 % de la superficie actual de la península ocupada por esta actividad ha sido deforestada. En la tabla 3.2 se presentan las superficies con cambio de vegetación en la península de Yucatán.

Tabla 3.2. Cambio de la vegetación forestal en los diferentes estados de la península de Yucatán.

Entidad	Cambio de uso	Deforestación	Revegetación	Sin cambios	Total
Superficie en hectáreas					
Campeche		91.74	148.24	1,057.22	1,297.21
Quintana Roo	78.2	849.78		1,184.59	2,112.56
Yucatán	1,413.04	10,055.49	1,772.50	19,197.45	32,438.48
Total	1,491.24	10,997.01	1,920.74	21,439.25	35,848.25

En la península de Yucatán hay 43 granjas porcícolas ubicadas en cuatro áreas naturales protegidas y una más en un sitio Ramsar (categoría designada a los humedales de importancia internacional). Además, se identificaron 122 granjas porcinas (47 % de las granjas de la zona) establecidas en regiones consideradas sitios de atención prioritaria para la conservación de la biodiversidad. Las granjas en sitios de conservación suman 20, mientras que las localizadas en sitios de restauración son 102, 65 % de ellas en lugares de prioridad extrema (tabla 3.3).

Tabla 3.3. Número y tipo de granjas porcícolas establecidas en la península de Yucatán.

Entidad	Nombre del área natural protegida	Tipo	Granjas
Campeche	Laguna de Términos	Federal	1
	Área de Protección de Flora y Fauna de Laguna de Términos	Ramsar	1
Yucatán	Geohidrológica del Anillo de Cenotes	Estatal	36
	Reserva Estatal Biocultural del Puuc	Estatal	2
	Cuxtal	Municipal	4

En el caso de la península de Yucatán, Batllori (2016) refiere que, de acuerdo con el Registro Público de Derechos de Agua de la Conagua, a finales de 2013, en los estados de la península de Yucatán se generaban 374 descargas pecuarias, con un total de nueve millones de metros cúbicos anuales, de las cuales 77 % correspondían a Yucatán, 17 % a Campeche y 6 % a Quintana Roo. Esta situación, en conjunto con la dificultad de contar con drenaje sanitario en la región (por la dureza del suelo y lo plano del terreno) ha provocado que las aguas subterráneas hayan sufrido un deterioro en su calidad. En diciembre de 2019, el equipo multidisciplinario de Greenpeace e investigadores de la Universidad Autónoma de Campeche llevaron a cabo un muestreo en cinco pozos, dos descargas directas de las granjas porcícolas y un cenote cercano a estas. Las tablas 3.4 y 3.5 resumen los resultados encontrados.

Tabla 3.4. Resultados de los muestreos para la norma NOM-001-SEMARNAT.1996.

ID	Amonio	Nitritos	Nitratos	N orgánico	N inorgánico	N total	C totales	C fecales
POZO 1	0.62	2.45	38.8	41.86	1.45	43.31		
POZO 2	2.16	4.16	18.4	24.72	1.12	25.84	> 2,400	240
POZO 3	0.66	1.62	6.32	8.61	2.89	11.49		
POZO 4	0.7	1.51	9.98	12.19	0.31	12.5		
POZO 4	1.25	2.45	23.28	26.97	0.69	27.66		
DESCARGA DIRECTA 1	1.68	1.47	33.25	36.41	0.03	36.44	240	93
DESCARGA DIRECTA 2	0.67	2.67	7.43	10.77	1.71	12.48		
CENOTE	65.92	1.54	10.75	78.21	7.69	85.9		
NOM-001-SEMARNAT	0.06					25		1,000
LFMAN*	0.01							
LFMAN**		0.01	0.01	0.04				

NOM-001-SEMARNAT-1996, Protección de la vida acuática y uso público urbano. LFMAN, Ley Federal de Derechos (disposiciones aplicables en materia de aguas nacionales) Conagua 2016. * Protección a la vida acuática; Agua dulce, incluye humedales. ** Protección a la vida acuática; Aguas costeras y estuarios

En términos específicos, el estudio concluyó lo siguiente:

- Cinco de las muestras rebasan los límites establecidos en la norma NOM-001-SEMARNAT-1996 para la protección de la vida acuática.
- Todas las muestras exceden los límites recomendados de NH₄, NO₂ y NO₃ para garantizar la salud de las personas según lo estipulado en la norma NOM-127-SSA1-1994 (modificación del 2000). Cabe aclarar que el agua de los pozos no es la que abastece el gobierno, pero la población la ha ocupado por mucho tiempo para consumo propio o para diversas actividades.

El estudio evidenció que los acuíferos en esta zona no cumplen con los criterios de calidad del agua para la protección de la vida acuática ni para la protección de la salud de las personas y, por tanto, representan un riesgo.

En la Figura 3.5. Vulnerabilidad a la contaminación del acuífero contra población porcina (<http://geoint.mx/site/publicacion/id/69.html>), se muestran los valores de densidad de contaminación porcina (DCP) en los municipios del estado. En ella puede corroborarse que los municipios con valores más altos de DCP (de colores negro y rojo) también se encuentran

en la zona norte de la Península, cercanos a la ciudad de Mérida.

En la figura 3.5 se muestran claramente las zonas menos vulnerables de contaminación del acuífero, es allí donde deben instalarse las granjas porcinas. En el caso contrario, las zonas de mayor vulnerabilidad se localizan cerca a la costa, principalmente en el anillo de cenotes. Estas partes del territorio yucateco deben dedicarse a actividades que representen una menor amenaza de contaminación del acuífero, como las actividades turísticas de bajo impacto (Batista, 2018).

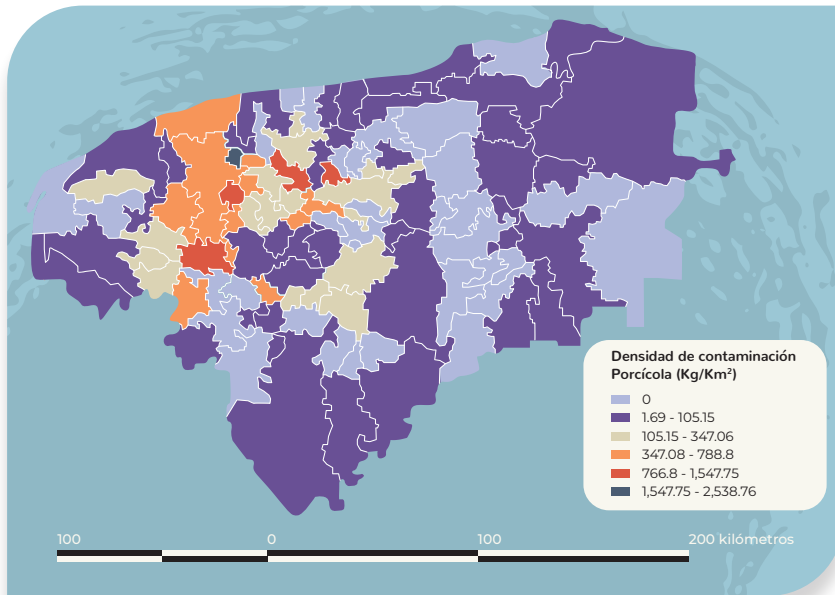


Figura 3.4.
Densidad de contaminación porcina de los municipios de Yucatán (Méndez et al., 2009).

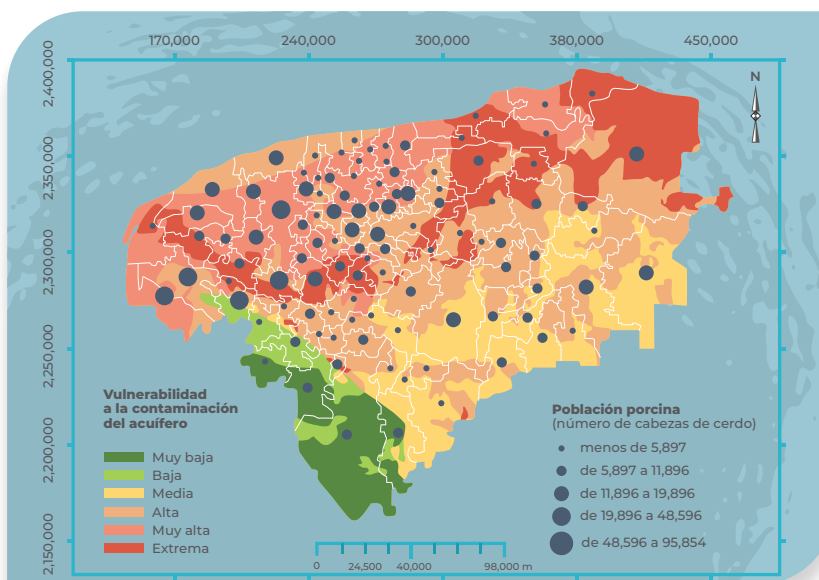


Figura 3.5.
Vulnerabilidad a la contaminación del acuífero contra población porcina (<http://geoint.mx/site/publicacion/id/69.html>).

CARACTERIZACIÓN de excretas porcinas



4

4 CARACTERIZACIÓN DE EXCRETAS PORCINAS

La cantidad, la edad y la etapa fisiológica de los cerdos; el tipo de alimento; el clima (temperatura y humedad); el tipo de bebederos (chupón o pileta), y el sistema de limpieza son factores que afectan el volumen o la producción de residuos en las granjas porcícolas: Los volúmenes promedio de los efluentes líquidos en las granjas de cerdos con respecto a las etapas de producción son los siguientes: gestación, 10 l/d; lactancia, 27 l/d; destetados, 1.4 l/d, cerdos (25 a 100 Kg), 7 l/d, y machos, 9 l/d. Se menciona que las granjas a pequeña escala generan una cantidad de agua residual por unidad animal casi tres veces mayor que la utilizada en granjas medianas y grandes, ya que en general estas empresas tienen sistemas de limpieza poco eficientes y hay desperdicio de agua (Ramírez Hernández Gerardo, 2015).

Kvolek Claudio (2019) menciona que los volúmenes de efluentes de las granjas porcícolas son grandes, con un promedio de 26 l/d por cerdo engordado, debido principalmente a la gran cantidad de aguas de

lavado utilizadas. Por otra parte, Druker *et al.* 2004 menciona que el agua residual de las granjas puede variar entre 17 y 62 litros por Unidad de Peso Animal de 100 kg UPA /día (es decir entre doce a cuarenta y tres litros por animal al día). El manejo del agua en general en las granjas es completamente arbitrario y muy particular a cada establecimiento.

Las características de las aguas residuales porcinas (ARP) presentan una variabilidad en su concentración en función de factores ambientales (características de la región), la tecnificación de la granja (por ejemplo, en el uso del agua), la etapa de producción (engorda, destete, maternidad o ciclo completo) y la alimentación de los cerdos, entre otros factores.

Los principales parámetros generalmente reportados en la información consultada han sido DQO, DBO y SST (Karakashev *et al.*, 2008; Garzón-Zúñiga *et al.*, 2014; Techio *et al.*, 2011; Victorica *et al.*, 2008; Jay-Myoung *et al.*, 2004; Garzón-Zúñiga *et al.*, 2007; Aubry *et al.*, 2006; Escalante *et al.*, 2012; Escalante-Estrada *et al.*, 2014). La variabilidad de las características de las ARP se puede observar en las gráficas de las Figura 4.1. Relación entre el número de animales y la concentración de parámetros (Garzón y Buelna, 2014). y 4.2 y en la tabla 4.1.

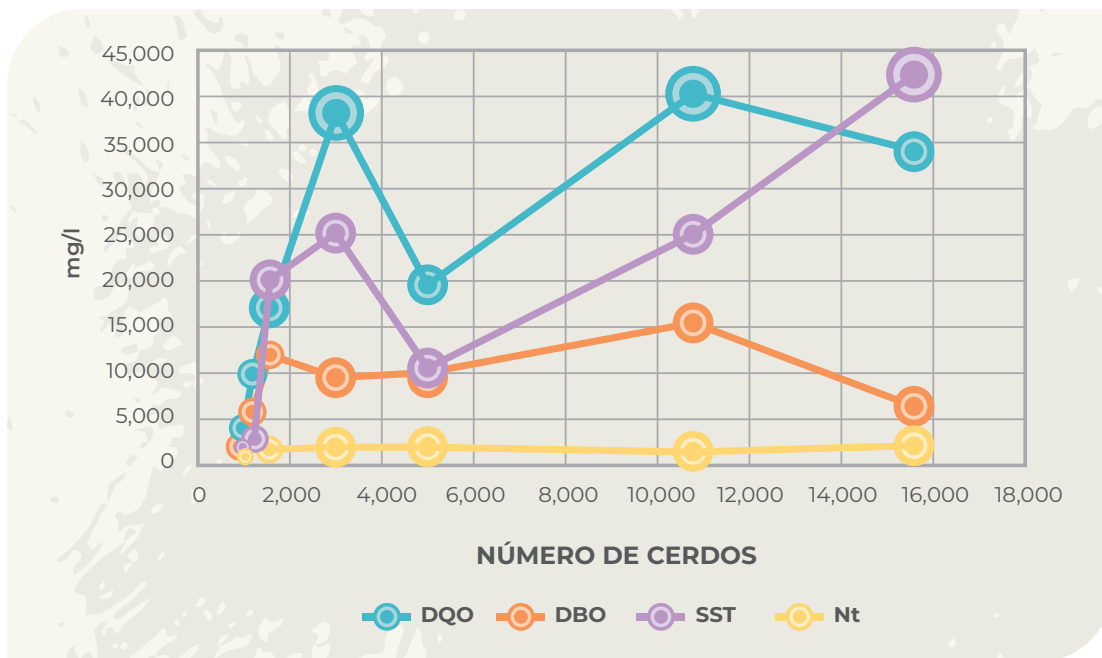


Figura 4.1. Relación entre el número de animales y la concentración de parámetros (Garzón y Buelna, 2014).

Gráfica elaborada a partir de datos de la etapa de engorda.

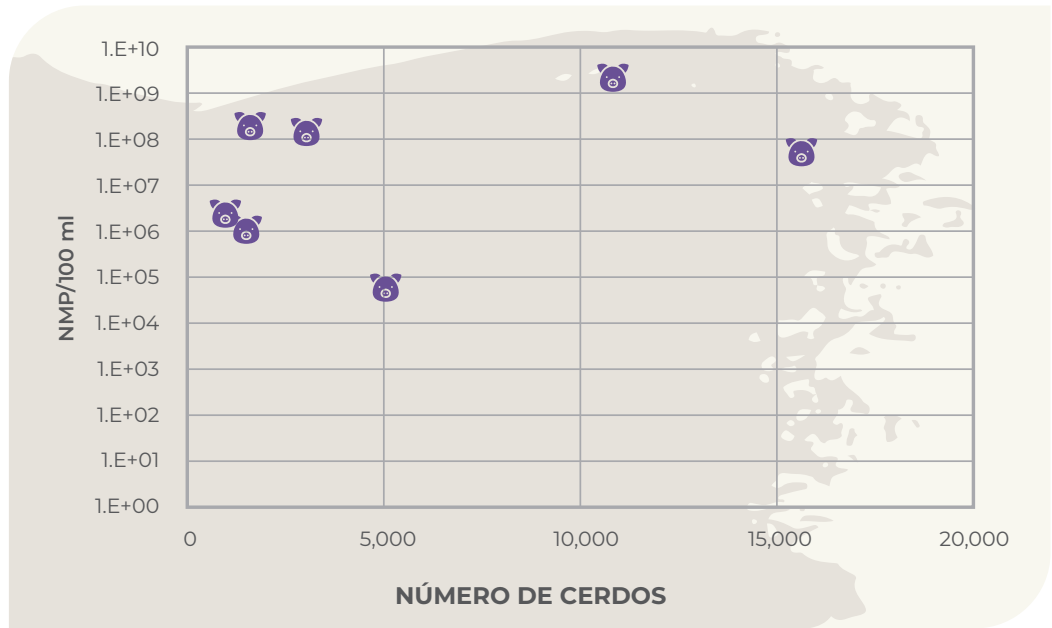


Figura 4.2. Relación entre el número de animales y la concentración de coliformes fecales (Garzón y Buelna, 2014).

Gráfica elaborada a partir de datos de la etapa de engorda.

Tabla 4.1. Variación de la concentración de DQO.

Número de animales en la granja	DQO (mg/l)	Referencias
120 cerdas	2,997	Victorica <i>et al.</i> , 2008
1,300 cerdos	15,928	Blanco <i>et al.</i> , 2015
3,500 cerdos	13,000	Hernández <i>et al.</i> , 2011
No reportado	15,462	Garzón-Zúñiga <i>et al.</i> , 2007
3,500 cerdos	15,593	Escalante <i>et al.</i> , 2014
No reportado	27,269	Techio <i>et al.</i> , 2011
15,600 cerdos	34,310	Garzón-Zúñiga <i>et al.</i> , 2014
20,000 cerdos	10,864	Blanco <i>et al.</i> , 2015

Las granjas porcícolas presentan una variación en su tamaño (chico, mediano, grande) y en la tecnificación de su producción (granjas tecnificadas, semitecnificadas, y no tecnificadas, estas últimas llamadas también de traspatio o familiares). La concentración de los efluentes de las granjas resulta ser diferente, siendo mayor cuanto más tecnificada se encuentre. (Escalante-Estrada y Garzón-Zúñiga, 2011).



RECOLECCIÓN

y conducción de excretas



5

5 RECOLECCIÓN Y CONDUCCIÓN DE EXCRETAS

En este capítulo se presentan opciones de producción porcina y su repercusión en el manejo de excretas. En primer lugar, tenemos dos opciones: sistema de producción en cama profunda y sistema de producción de cerdos a campo. En el caso de la primera opción, el porcicultor lleva a cabo el manejo de excretas en forma sólida para su posterior composteo y vermicomposteo. En la segunda opción, las excretas las depositan los animales en el terreno del potrero y van a enriquecer de forma natural estos suelos, donde crecen forrajes que les sirven de alimento complementario. Ambos tipos de producción implican un ahorro en la inversión para la construcción de instalaciones de sistemas de tratamiento de agua y lodos residuales. En segundo lugar está el sistema de producción porcina confinado, en el cual hay un sistema de recolección y conducción de las excretas en forma líquida que son llevadas por medio de canales a un tren de tratamiento de agua y lodos (pretratamiento, digestores anaerobios, lagunas o humedales, desaguado de lodos, composteo), para el cumplimiento de la normatividad vigente, con la

consiguiente inversión en infraestructura, energía, operación y mantenimiento.

5.1 Sistemas de producción porcina en cama profunda

De acuerdo con Beyli et al., (2012), la producción porcina en cama profunda se refiere a “sistemas alternativos de producción que disminuyen los problemas ambientales y son de baja inversión, porque se diseñan naves de tipo industrial sin piso de concreto o fosa, pero sí son techados, para evitar que el impacto de las lluvias provoque mayores escurrimientos, es decir, el piso es de tierra, lo cual permite la adecuada percolación de los lixiviados, con reducción significativa de uso de mano de obra en limpieza y manejo y, por ende, uso de fuentes de energía y agua” (figura 51).

Este manejo de las excretas en forma sólida y no líquida reduce la emisión de olores y, por lo tanto, la incidencia de moscas. En estos sistemas se reduce en más de 50 % la emisión de amoníaco (NH_3) en comparación con los sistemas de piso de concreto y se reduce también la posibilidad de contaminación del agua y del cúmulo de desechos en lagunas (Araque, González, Sulbaran, Quijada, Viloría y Vecchionacce, 2006).



Figura 5.1. Sistema de producción porcina en cama profunda (Maisonave, 2016).

La limpieza y recolección es manual, con ayuda de rastrillos y carretillas. El material se retira y se puede llevar directamente al sistema de composteo o vermicomposteo.

Araque *et al.*, (2006) resumen así las ventajas del sistema de recolección de cama profunda:

- Menor impacto ambiental, debido al manejo correcto de las deyecciones.
- Menor consumo de agua. No se utiliza agua para el lavado, como en la producción intensificada, para la eliminación de las deyecciones.
- Aprovechamiento de la cama para uso agrícola y como fertilizante orgánico, así como materia prima para la producción de composta y humus de lombriz.

Otros autores, como Hill (2000), Roppa (2000), Cannon (2001) y Oliveira (2001) mencionan además otras ventajas del sistema de cama profunda:

- Mejor desempeño animal.
- Respeto al animal proporcionado por un mejor bienestar.
- Protección del medio ambiente, debido al uso de todas las excretas en forma de compostaje o como abono orgánico.
- Menor inversión a corto y largo plazos.
- Una mejor venta de un producto que atiende las exigencias del consumidor moderno (ambientalista). En Estados Unidos se paga un sobreprecio por la carne proveniente de estos sistemas.

Aspectos técnicos del sistema de cama profunda

Existen básicamente dos tipos de galpones con cama profunda, las cuales poseen características particulares (Hill, 2000): 1) Galpón tipo túnel y 2) Galpón sin divisiones.

Galpón tipo túnel

Para climas templados.

- Techo constituido por un armazón tubular de hierro en forma de arco, con una cubierta de

polipropileno sujeta a una media pared de madera o concreto de 1.2–1.8 metros de altura

- Diseñados para alojar 180–200 animales
- Área de 1.1 m² por animal (0.84 m² de cama, 0.27 m² de área de concreto)

Galpón sin divisiones

- Medio ambiente controlado a través de una ventilación natural a lo largo de la instalación
- Sistema de alimentación seco/húmedo para maximizar la producción
- Instalaciones diseñadas para alojar entre 500 y 2,800 cerdos, dependiendo del tamaño del galpón, del flujo y la densidad animal
- Tamaño de lotes de 200 a 250 animales, animales de una sola edad, con variación máxima de una semana entre lotes, para evitar transmisión de enfermedades
- Manejo todo dentro-todo fuera.

La mayoría de estas instalaciones provienen de la renovación y conversión de galpones de pollos de engorde, siendo el tipo de estructura más usado en el trópico, ya que combina las ventajas de la cama como colector de excretas con los adelantos tecnológicos de los sistemas de confinamiento tradicional.

Aspectos generales

Araque H. *et al.* (2006) mencionan otros aspectos que se deben tener en cuenta:

Ventilación. Una buena ventilación garantiza la viabilidad de los animales en el sistema de cama profunda. El calor dentro del galpón puede aumentar alrededor de 8 °C por encima de la cama en relación al medio ambiente externo, por lo que deben estar bien ventilados.

Tamaño del galpón y densidad de población. Tamaño adecuado y respeto a la densidad, fuentes de agua y sitios de alimentación controlados. La densidad animal recomendada es alrededor de 1.4 m² por cerdo para garantizar el buen uso de la cama y minimizar los requerimientos de manejo. El galpón debe tener

paredes laterales de 0.30–0.40 m de altura, con una tela de protección para cerrar el galpón y controlar la ventilación con cortinas en los laterales del galpón, así como para evitar la entrada de lluvia y sol.

Ubicación de los galpones. Estos sistemas se diseñan sobre suelos arenosos o que tengan buena capacidad de absorber agua, además de construir el galpón en sentido transversal al viento predominante y con orientación este-oeste.

Cama. Tener en cuenta el tipo de paja, su cantidad, calidad, profundidad y mantenimiento. Es necesario agregar una cama limpia y seca periódicamente para lograr que el galpón permanezca seco y con menos olor. La cama debe tener como mínimo 0.5 m de espesor.

Piso. Debe ser siempre de tierra, y sobre este se coloca una capa de piedra y arena para el filtrado de líquidos; los materiales más usados son concha de arroz, soca de maíz y sorgo, papel picado. El más recomendado y utilizado es el heno de gramíneas. Dependiendo de la ventilación, es necesario ir agregando más cama durante el periodo de engorde. Una regla práctica del sistema es usar 1 kg de cama por cada kg de carne de cerdo producido. Por tanto, un cerdo que entra de 20 kg y se engorda hasta los 100 kg requiere 80 kg de cama para abrigarlo durante el periodo de tres meses de engorde. Entonces, debido al gran consumo de cama, el sistema es indicado para regiones que tengan buena disponibilidad de los materiales de la misma.

Manejo de agua. Según Gallardo (2000), el agua de consumo no debe escurrir hacia la cama, pues una de las ventajas de este sistema es economizar agua, sin perjudicar el consumo de la misma por los animales. Después de la salida de los cerdos, a los tres meses, se debe retirar la cama, el piso debe recubrirse con una pequeña capa de cal y debe atender a un período sanitario de diez días.

5.2 Sistemas de producción de cerdos a campo

Araque (2006) menciona que la producción de cerdos a campo no es un sistema reciente. Antiguamente, los cerdos se producían en condiciones extensivas, posteriormente; en potreros, y en tiempos recientes se ha llevado a cabo una producción intensiva estabulada con la generación y uso de alta tecnología. De esta forma, las condiciones para los animales y el ambiente no son las mejores. En Latinoamérica se ha imitado tecnología que no es adecuada para nuestros países, sobre todo por la alta carga contaminante que se genera con el manejo de las excretas. Actualmente se pretende retomar algunas formas de producción antiguas, implementándolas con herramientas tecnológicas modernas. La implementación de sistemas de producción porcina a campo en zonas tropicales puede ser una opción para reducir los altos costos de infraestructura y contaminación ambiental (figura 5.2). En este sentido, los sistemas de producción a campo son una opción viable para:

- Pequeños productores
- Productores que se inician en la actividad porcina
- Productores que planean un crecimiento de sus granjas
- Productores que tienen problemas con el manejo de las aguas residuales

Todo esto unido a sus bajos costos de inversión, la reducción de la contaminación (agua, suelo y aire) y su valoración agronómica (Dalla Costa y Monticelli, 1999), sobre todo en países tropicales y con altos costos de producción de carne de cerdo.



Figura 5.2. *Sistemas de producción porcina a campo (Universo porcino, 2013).*

Ventajas y desventajas de los sistemas de producción a campo

Wheaton y Rea (1993) y Santos y Sarmiento (2005) opinan que la producción de cerdos a campo presenta las siguientes ventajas y desventajas:

Ventajas

Reducción de costos de alimentación con el uso de pastos. Los cerdos tienen acceso a alimento fresco con una fuente regular de minerales y vitaminas.

Provee ejercicio y nutrientes requeridos sobre todo por las cerdas gestantes y en otras etapas de crecimiento.

Costos de infraestructura menores que el confinado tradicional. Reduce costos de inversión.

Desventajas

Mayor requerimiento de mano de obra para alimentar, por la extensión de terreno utilizado.

Es difícil manejar a los animales individualmente.

Aumentan las probabilidades de incidencia de parásitos internos.

Rentabilidad similar a sistemas de producción confinados tradicionales

Mayor trabajo en los partos.

Buen uso de terrenos no aptos para cultivos.

El lodo y la humedad pueden aumentar la mortalidad de lechones.

La presencia de cerdos y excretas incrementa actividad biológica del suelo.

Requiere más tiempo para llevar los animales al matadero.

Mejor incidencia solar en los animales y control de enfermedades.

Mayor requerimiento de superficie que en otros sistemas.

No hay uso de agua en lavado de corrales, por lo que se eliminan los problemas del manejo de efluentes

Los depredadores pueden ser difíciles de controlar.

Reduce canibalismo y problemas de peleas entre animales.

Los problemas reproductivos pueden ser más difíciles de detectar.

Disminuyen los problemas por daños podales (daños de los cascos, grietas y roturas en las pezuñas) debido al tipo de piso de cemento y a características como el peso del animal.

El manejo técnico de cerdos a campo se realiza en potreros, ubicados en terrenos con buena capacidad de drenaje y con pendiente no superior al 10 %, no aptos para cultivos, siempre y cuando no se trate de reservas ecológicas, como selvas o bosques. Se debe colocar una cerca perimetral con tela metálica de alambre galvanizado a una altura de 1.20 m en los potreros. Las divisiones de los potreros se hacen a través de hilos de alambre electrificados a 15 y 40 cm del suelo respectivamente, pero se adecúan según el estado fisiológico en el que se esté trabajando. En niveles más rústicos, estas divisiones se pueden implementar con los materiales disponibles en la región, incluso se puede implementar el uso de barreras biológicas. La densidad de población se maneja bajo el criterio de que las madres dispongan de un área de entre 600 y 1,000 m². Los potreros para cerdos en crecimiento deben ser de dos a tres camadas con un área por lechón de 70 m². La densidad de los animales en crecimiento depende del clima, características físicas del suelo (drenaje) y tipo de cobertura del suelo (forraje). Las fuentes de agua son bebederos tipo chupetes conectados a una tubería enterrada a ± 35 cm para evitar el calentamiento. El consumo medio por cerda alojada es de 20 l/día. Los comederos pueden ser construidos en concreto para madres

y verracos (sementales), para lechones y cerdos en engorde pueden tener forma circular, con estructura de plástico, concreto, metal o madera y con protección contra la lluvia (Dalla Costa, 1998; Vadell, 1999 y Vadell *et al.*, 2003). Se necesitan casetas de sombra, de varios tipos, para las distintas etapas productivas de los cerdos a campo. Se usan pequeñas chozas portátiles, lo que permite realizar rotaciones en el terreno. Estas deben ser resistentes, de estructura de madera, con techo de paja o de zinc con cubierta aislante. Para las cerdas en gestación, deben ser abiertas en lados contrarios en la caseta, para favorecer la ventilación, y cuyas dimensiones pueden ser de 2.9 x 3.0 x 1.10 m (ancho x largo x alto). Las cabañas de maternidad deben presentar las siguientes dimensiones: 1.45 x 3.0 x 1.10 m (ancho x largo x alto) permitiendo el alojamiento de una madre con su camada (Vadell y Barlocco, 1995). En el suelo de las casetas se coloca la cama de paja en gestación. Goenaga (2002) reporta que la cama de paja en gestación condiciona el éxito de la cría a campo. Colocar paja de la mejor calidad para que la cerda construya su nido (mullido y térmico) es la clave para reducir la mortalidad de lechones por aplastamiento o enfriamiento. Se coloca 2 o 3 días antes del parto, ubicando las pacas de paja a la entrada de la paridera, y se deja que la cerda por sí sola construya su nido, lo que ocurre de 8 a 24 horas antes del inicio del parto. A lo largo de la lactancia es necesario ir añadiendo pequeñas cantidades de paja, alrededor de una (1) paca de gramínea seca por semana.

La alimentación en los potreros con forrajes contribuye a disminuir la sensación de hambre en animales subalimentados (Santos y Sarmiento, 2005). Asi-

mismo, la alimentación de cerdos con dietas fibrosas reduce la incidencia de conductas orales (mordisqueo) repetitivas (Ramonet *et al.*, 1999). En consecuencia, el consumo de forraje durante el pastoreo en los sistemas de producción a campo puede contribuir a reducir las actividades estereotípicas relacionadas con el hambre, las cuales son observadas con frecuencia en los sistemas de producción convencionales.

El sistema intensivo de crianza de cerdos al aire libre (Siscal), usado en Brasil desde 1987, se ha adoptado en varios países con variaciones en el tamaño de los potreros, número de cerdas por cabaña y tipo de comedero. La característica principal es la cría de cerdos a cielo abierto con refugio en cabañas. Este sistema tiene implicaciones positivas en el ambiente, la salud animal y el balance energético de los animales; requiere menos instalaciones, y tiene como resultado la posibilidad de producir un cerdo orgánico (Pinheiro y Hotzel, 2000).

La producción de cerdos a campo tiene actualmente el propósito de llevar a cabo una producción intensiva, considerando las bondades de la genética porcina actual, pero llevada a cabo en instalaciones de bajo costo, en recintos donde no se produce contaminación ambiental y con mayor confort y respeto a los animales. Con adecuaciones a este sistema productivo se ha logrado obtener índices productivos comparables con la producción convencional. Su implementación representa una alternativa a la población rural para que produzca proteína animal y poco a poco ayude a mejorar su calidad de vida y a generar empleo.



5.3 Sistemas de producción porcina confinados

Los cerdos son mantenidos en corrales sobre pisos con rejillas que se lavan diariamente. Los residuos generados constituyen una solución acuosa afluyente o purín, con excretas animales líquidas y sólidas, partículas de alimento, agua de lavado de pisos y consumo animal.

Maisonave *et al.* (2016) mencionan que los sistemas húmedos o líquidos son comúnmente de piso de cemento sólido o de piso emparrillado de material plástico o cemento. En el caso del piso emparrillado, las excretas percolan a través de los espacios abiertos. En ambos casos, las excretas son finalmente evacuadas de los galpones gracias a la acción de arrastre provocada por una lámina de agua moviéndose a favor de un gradiente de pendientes.

Los pisos de cemento deben poseer un declive máximo del 6 %, para facilitar su limpieza y desinfección.

Los sistemas de producción porcina requieren la existencia de grandes áreas destinadas al almacenamiento y tratamiento de estos residuos con cos-

tosos sistemas de separación y tratamiento de los mismos, lo que conlleva grandes inversiones por parte de los productores, quienes la mayoría de las veces no logran reducir el potencial contaminante de estos residuos (Araque, H.; González, C.; Sulbaran, L.; Quijada, J.; Vilorio, F. y Vecchionacce, H., 2006).

En las figuras 5.3 y 5.4, se observan los pisos de un galpón donde se encuentran los animales, que está dividido en dos partes: la parte seca, donde se disponen los comederos, y la parte húmeda, donde se disponen los bebederos. En esta última, el piso de cemento presenta unas rejillas, por donde se canaliza el agua de lavado, la orina y las excretas. Este residuo llega a unas canaletas que captan este líquido para su posterior conducción por medio de canales al área de tratamiento, que en este ejemplo consiste en una serie de fosas para la sedimentación de sólidos. El efluente no es constante, por lo que la movilidad de las excretas se reduce al tiempo que duran las operaciones de lavado. Esto provoca estancamiento de excretas en las fosas de captación y los canales, dando tiempo a la descomposición de los desechos, el desprendimiento de amoníaco y a la generación de olores dentro de los galpones, con la consecuente afectación a los porcinos y a proliferación de moscas, larvas y otros insectos nocivos.



Figura 5.3. Sistemas de producción porcina confinados.



Figura 5.4. Ejemplos de conducción y tratamiento de efluentes porcinos.



SISTEMA DE TRATAMIENTO

de aguas residuales



6

6 SISTEMA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES

Un sistema de tratamiento de aguas residuales es una sucesión de operaciones unitarias, realizadas en serie, para depurar el agua residual y los lodos provenientes de un proceso. El sistema puede estar conformado por un pretratamiento, un tratamiento primario, un tratamiento secundario y un tratamiento terciario, dependiendo de las características de las aguas residuales a tratar y de las características especificadas para el efluente final.

En el tratamiento primario se lleva a cabo la eliminación de sólidos en las unidades de sedimentador primario y de separación de sólidos o grasas mediante flotación o tratamiento fisicoquímico.

El tratamiento secundario tiene por objeto la eliminación de materia orgánica a través de un reactor biológico, dependiendo del tipo de este, puede requerirse un sedimentador secundario.

El objetivo del tratamiento terciario es la eliminación de sustancias específicas, tales como fósforo, nitrógeno, metales pesados, etc. El proceso biológico puede complementarse con coagulación y floculación para eliminar totalmente los sólidos. También es posible remover color y olor mediante filtración con carbón activado.

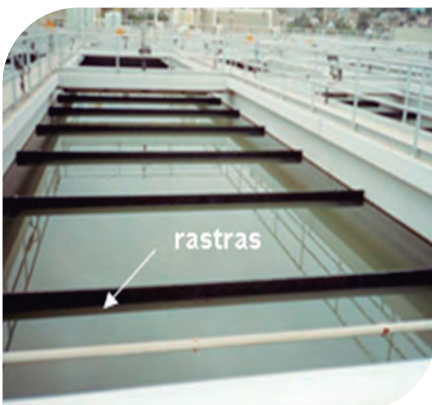
La desinfección tiene como objetivo la eliminación de microorganismos patógenos en el efluente, y puede llevarse a cabo mediante cloración, ozonización, luz ultravioleta o lagunas de maduración.

Los lodos provenientes del tratamiento del agua residual pueden ser tratados mediante las siguientes operaciones unitarias: espesamiento, digestión (anaerobia o aerobia) y deshidratado.

La selección de un sistema de tratamiento de aguas residuales depende de factores como la carga contaminante a tratar, el volumen de agua residual descargada y las características que deba tener el agua al final del tratamiento, de acuerdo con la normatividad de referencia (Pérez, 2002).

Generalmente, las alternativas de tratamiento de las aguas residuales porcinas (ARP) aplicadas en México se han enfocado en la remoción de sólidos mediante métodos físicos (cribado, tornillos, centrifugación, sedimentación) y en la remoción de materia orgánica mediante procesos biológicos (digestores anaerobios, lagunas anaerobias, lagunas facultativas y humedales artificiales). Muchos de estos sistemas de tratamiento se han construido sin una caracterización previa de los efluentes generados en las granjas y sin el seguimiento de un diseño adecuado de los procesos aplicados, por lo que en dichos sistemas no se obtiene la eficiencia esperada de remoción de sólidos y materia orgánica (Escalante *et al.*, 2012).

Trejo-Lizama (2014) menciona que en la crianza intensiva de cerdos en el estado de Yucatán se han establecido 62 biodigestores en los últimos diez años, lo cual



ha permitido realizar el tratamiento de las descargas de aguas residuales de igual número de granjas, con alrededor de 5,000 cerdos cada una.

En otro estudio se reporta que se han evaluado biodigestores tipo tubular elaborados con geomembrana plástica, con capacidad para 4 m³ de ARP, en los sistemas de pequeños productores, y se ha observado que a mayor tiempo transcurrido de la instalación de los biodigestores ha disminuido la eficiencia de tratamiento de los sólidos totales (ST), que fue el parámetro evaluado.

Separación de sólidos

La eliminación de sólidos de las aguas residuales se puede realizar por métodos físicos, mediante operaciones unitarias como las cribas, que permiten eliminar material como arenas, grava, ramas, bolsas de plástico y basura gruesa, o por acción de la gravedad (sedimentación).

Las cribas o rejillas (figura 6.1) se emplean para atrapar sólidos de diferentes tamaños y tipos, como son ramas, bolsas, llantas etc., que se encuentren en suspensión en las aguas residuales. Se clasifican en cribas gruesas (retención de sólidos gruesos), medianas (retención de sólidos medianos) y finas (retención de sólidos de menor tamaño). Los sólidos atrapados en las rejillas pueden ser retirados de forma manual o automática.

Después de la operación de cribado, los residuos pasan al canal desarenador (figura 6.1), cuyo propósito es la separación de sólidos inorgánicos, como arena y grava, de las aguas residuales. La remoción de arena y grava de las aguas residuales puede evitar daños en el equipo de bombeo, por sus efectos abrasivos, así como el azolvamiento de las estructuras de los procesos siguientes. Los desarenadores pueden tener canales rectangulares o tanques cuadrados.

En la operación de sedimentación se remueven partículas que no son eliminadas mediante el cribado y desarenado. La operación consiste en el asentamiento de las partículas sólidas en el fondo de un tanque de concreto (circular o rectangular), acumulándose y dando origen a los lodos primarios.

Figura 6.1. Ejemplos de rejillas y desarenadores para el tratamiento de aguas residuales (Escalante et al., 2000).

6.1 Procesos anaerobios

6.1.1 Fosas o tanques sépticos

Las fosas o tanques sépticos (Figura 6.2. Fosa o tanque séptico de un compartimiento (Escalante et al., 2000). y 6.3) son unidades construidas en zonas donde no hay drenaje. Su ubicación debe encontrarse lo más lejos posible de la zona habitada (hasta 100 m) para evitar los malos olores producidos durante el tratamiento. Consisten básicamente en un tanque construido comúnmente con ladrillos, mortero y cemento, aplanados en su interior y con una profundidad entre uno y dos metros. Algunas veces pueden presentar una trampa para separar las grasas. Sus componentes principales son zona de espumas, zona de sedimentación y zona de lodos. Esta última se subdivide en zona de digestión de lodos, que corresponde a los lodos de la parte superior, y zona de almacenamiento, correspondiente a los lodos del fondo (Escalante et al., 2000).

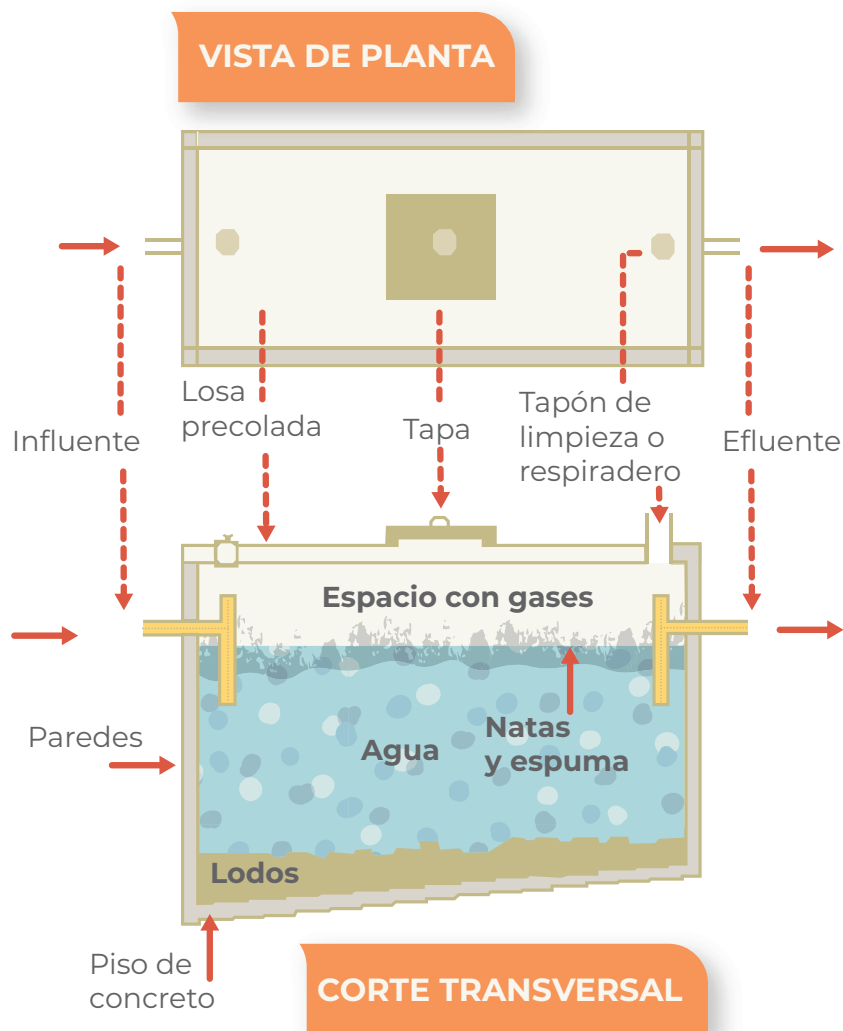


Figura 6.2. Fosa o tanque séptico de un compartimiento (Escalante et al., 2000).

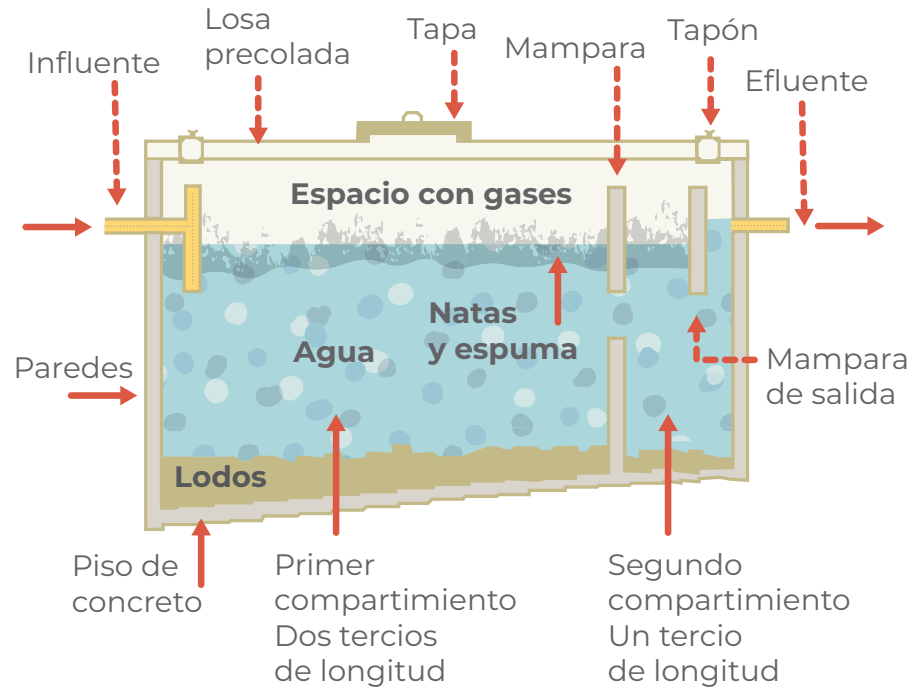


Figura 6.3. Fosa o tanque séptico de dos compartimientos (Escalante et al., 2000).

6.1.2 Reactor anaerobio de flujo ascendente

En el reactor anaerobio de flujo ascendente (RAFA), el agua residual a tratar es conducida desde la parte superior del reactor (tanque) hacia el fondo del mismo por medio de tubos. El influente fluye en sentido ascendente a través de un manto de lodos (microorganismos anaerobios), llevándose a cabo de esta forma el tratamiento.

El biogás producido en condiciones anaerobias (principalmente metano y dióxido de carbono) genera una circulación interior (mezclado). El biogás, el lodo y el líquido tratados ascienden a la parte superior del reactor, en donde entran en contacto con deflectores que permiten la separación del biogás y la sedimentación del lodo. El biogás es capturado en la campana de recolección que se encuentra en la parte superior del reactor. El líquido tratado (efluente) sale por la parte superior.

El agua residual debe estar distribuida uniformemente, cerca del fondo del reactor (10–20 cm), mediante una serie de tubos, cada uno de los cuales cubre un área de 1 o 2 m² del fondo del tanque. La geometría de un RAFA corresponde a un tanque circular (figura 6.4) o rectangular que puede estar completamente tapado, por lo que en este caso solo se podrán observar los tubos de recolección de gas. En otros casos se podrán observar, en la zona superior del reactor, el sedimentador, los vertedores y el sistema de recolección de gas. El recolector de

biogás puede encontrarse ya sea entre dos unidades de sedimentación o sobre el borde del sedimentador. En cuanto al material de construcción, el reactor puede estar construido con concreto armado y un revestimiento anticorrosivo. La forma rectangular presenta facilidades para la distribución del influente en el fondo del reactor y la modulación del sistema. Algunos reactores presentan



Figura 6.4. RAFA de geometría circular. (Conagua, MAPAS, 2015).

varias unidades de sedimentación, dependiendo de su tamaño (Escalante *et al.*, 2000).

6.1.3 Digestión anaerobia

La digestión de los lodos tiene por objeto reducir su volumen y hacerlos inoctrinos, removiendo sólidos, materia orgánica y microorganismos que se encuentran en los lodos primarios, secundarios y mezcla de ambos. La estabilización o reducción del contenido de las substancias contaminantes de los lodos se realiza de manera aerobia o anaerobia, mediante la cual se reduce el contenido de sólidos suspendidos volátiles hasta en un 50 %. Los lodos, una vez estabilizados o digeridos, son deshidratados (Escalante *et al.*, 2000).

Los digestores anaerobios son tanques cerrados herméticamente (para prevenir la entrada de oxígeno)

🗨️ Biogás rico en metano (CH₄) que puede utilizarse para generar calor o electricidad.

🗨️ Digestato o lodo residual estabilizado (biosólido), que después de un acondicionamiento puede utilizarse como fertilizante o mejorador de suelos.

🗨️ Efluente o agua residual tratada que puede utilizarse dentro de la granja para lavado de pisos, dilución de biomasa, recirculación al biodigestor y fuera de la granja en riego agrícola o de áreas verdes.

que reciben un influente (sustrato), el cual se transforma por medio del proceso de estabilización anaerobia en productos utilizables.

La digestión anaerobia también se realiza en un tanque cerrado ausente de aire, donde se mantiene una



Figura 6.5. *Digestor anaerobio de lodos (Escalante et al., 2000).*

temperatura entre 30 y 38 °C para propiciar el crecimiento de bacterias anaerobias que entran en respiración endógena, reduciendo la materia celular. Una fotografía de un digestor anaerobio de lodos se presenta en la figura 6.5.

Los diferentes usos deben cumplir con la legislación vigente en cada país. En México deben cumplir con las siguientes normas:

- Reutilización del agua residual tratada, NOM-003-SEMANART-1997
- Descarga de agua residual tratada a cuerpo receptor, uso en riego o disposición en suelo, NOM-001-SEMANART-1996.
- Uso del biosólido como mejorador de suelos, NOM-004-SEMARNAT-2002
- Uso de biogás para generación de calor o electricidad; debe cumplir con los parámetros de calidad para protección de equipos y motores de acuerdo con las especificaciones del fabricante.
- El manejo adecuado y eficiente de estos recursos permite la protección del medio ambiente y el manejo de los recursos de una forma sustentable y dentro de una economía circular. La figura 6.6 muestra un esquema de la forma de manejar estos recursos en granjas y establos.

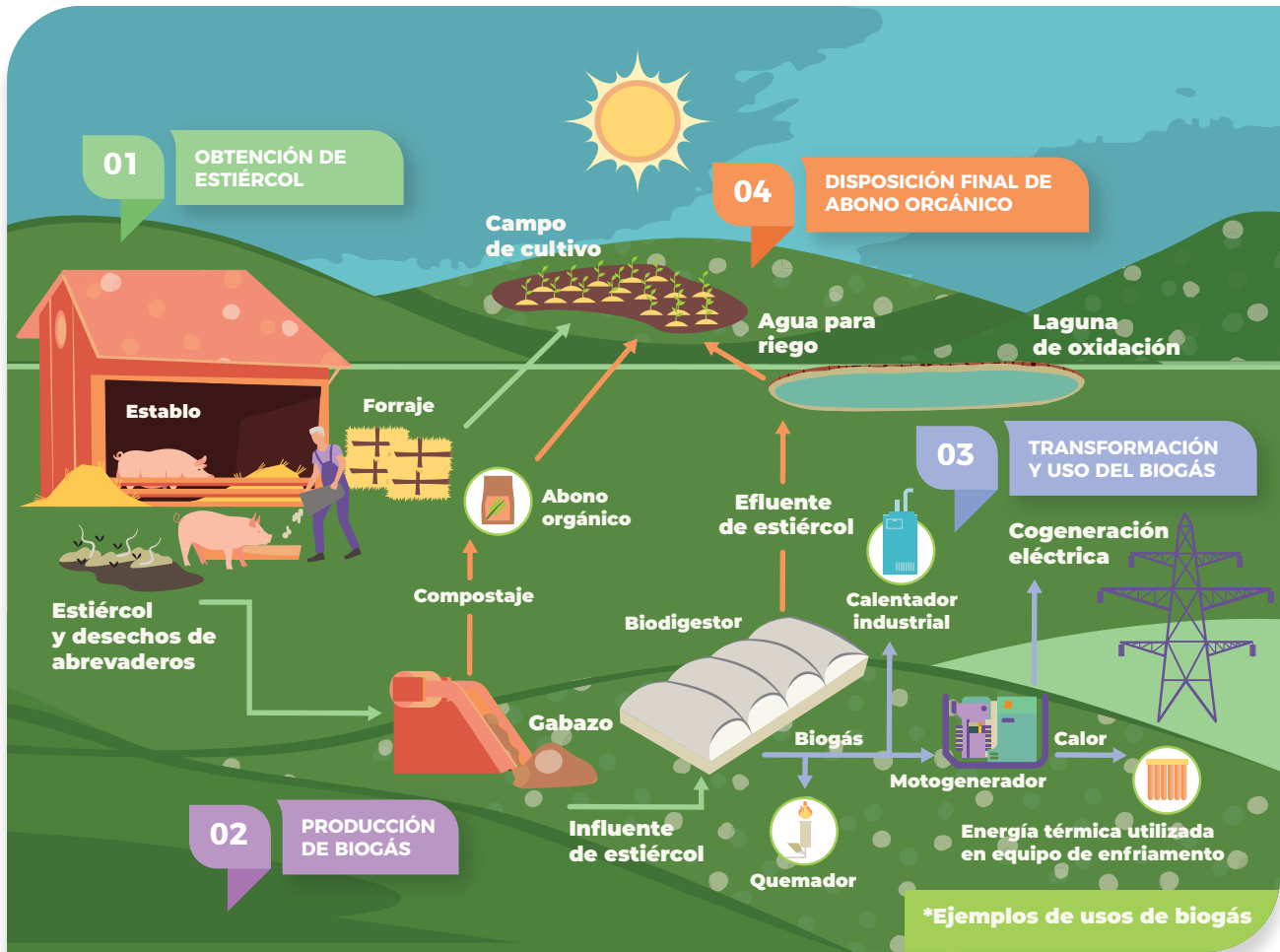


Figura 6.6. Manejo y aprovechamiento de recursos en granjas y establos.

https://lh3.googleusercontent.com/proxy/tpxOFM1uZhIAa3SL_Yyv2KQLNoojuPdGpgSAt8tHKswDTEeQ4uYF7oVq15KyrMIWUwAV9ld4S2lIVZjCUNBNGFVktDmG9OU7CrTyYDNswvFEHJAnOhU8CEL

6.1.4 Biodigestores

De acuerdo con Sosa Cáceres y Shao (2007), las excretas porcinas son una fuente de recursos nutrimentales y energéticos, por lo que al reciclarse contribuyen a la sustentabilidad de la producción porcina. Los procesos fermentativos se conocen en todo el mundo. Existen diferentes tipos de biodigestores, los más utilizados en la agricultura son los de régimen semicontinuo, que de acuerdo con su principio de funcionamiento y construcción pueden ser los siguientes:

6.1.4.1 Biodigestor de campana flotante o tipo hindú

Una parte se construye con ladrillos, cemento y acero para la campana que flota sobre el residual del digestor, que es donde se almacena el biogás. Otros se hacen de ferrocemento, fibra de vidrio, polietileno de alta densidad, PVC, láminas rígidas de PVC y hasta cemento y bambú. Se construyen de forma vertical u horizontal, y en cuanto a su uso social y volumen pueden ser individuales o comunales (figura 6.7).

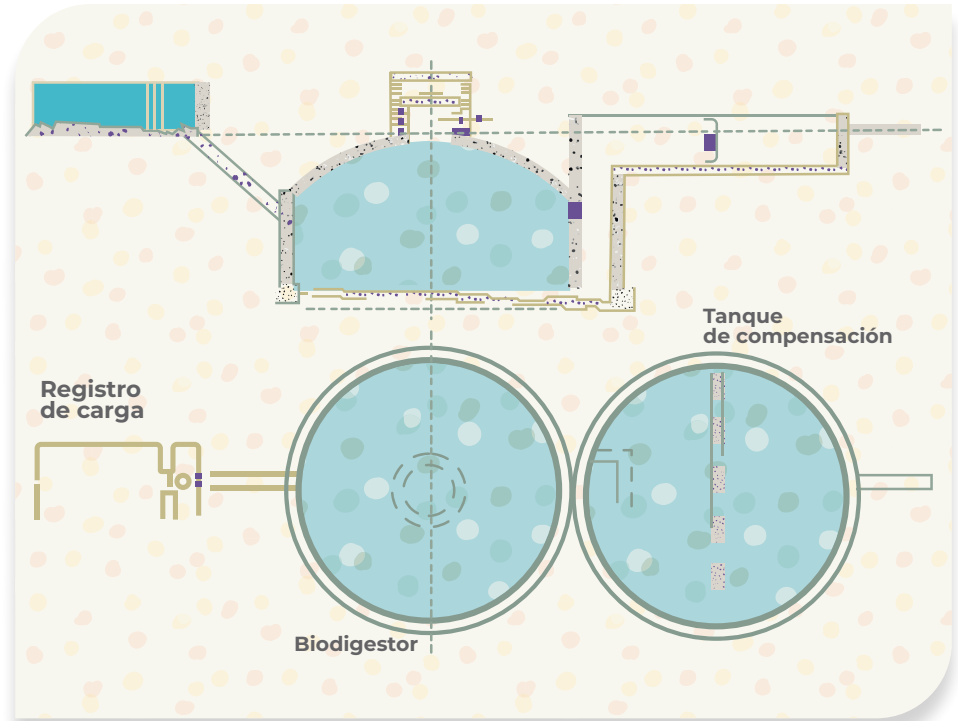


Figura 6.7 Biodigestor de campana flotante (Sosa Cáceres et al., 2007).

6.1.4.2 Biodigestor de cúpula fija o tipo chino

Alrededor de siete millones de plantas han sido construidas en China, las cuales son fabricadas de distintas formas y capacidades y con diferentes materiales, pero tienen un diseño básico, en el que el biogás es colectado en una cúpula fija. Este tipo de biodigestor está compuesto por un registro de carga, el digestor y un tanque de compensación. En este modelo se construye el cilindro con bloques de hormigón, y la cúpula con ladrillos de barro. La excreta ya tratada y secada al sol en lecho se usa como abono orgánico en las siembras, y el líquido almacenado para el fertirriego (figura 6.8).





Figura 6.8. Biodigestor de cúpula china (Sosa Cáceres, et al., 2007).

6.1.4.3 Biodigestores de tipo tubular.

Son fabricados de goma, polietileno o *red-mud plastic* (RMP). Este último material fue desarrollado por primera vez en Taiwán y después en China, donde ha demostrado sus excelentes cualidades para su uso en biodigestores. Este material, producido en forma laminar, es una mezcla de lodos rojos residuales de la extracción de la bauxita y contiene PVC, plastificador, estabilizador y otros ingredientes. Al principio, los digestores de RMP se hacían tubulares, más tarde se construyeron en forma de tiendas de campaña. También de esta forma se han construido biodigestores en Nepal, pero de PVC (figura 6.9).



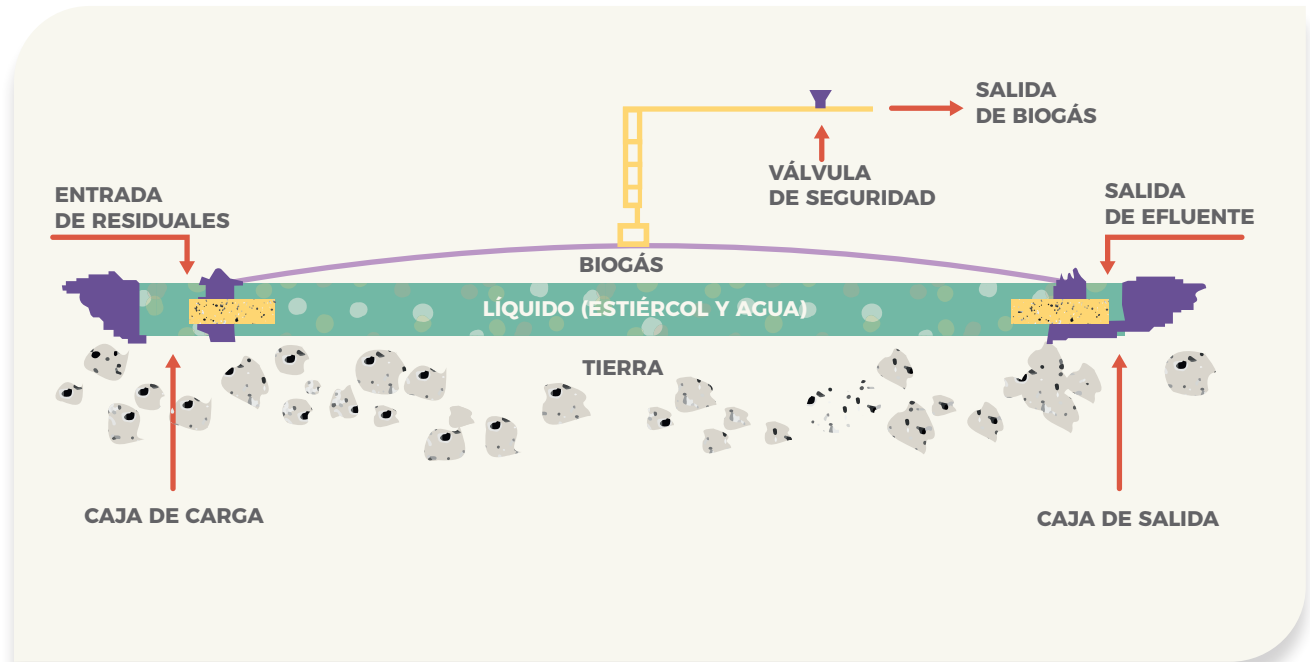


Figura 6.9. Biodigestores de tipo tubular (Sosa Cáceres, et al., 2007).

El biodigestor tubular plástico

Este tipo de digestor fue originalmente desarrollado en Taiwán, y posteriormente ha sido simplificado aún más. Algunas de las ventajas de los biodigestores plásticos residen en que pueden construirse con materiales locales no sofisticados. Por otra parte, la construcción y el mantenimiento de estos reactores se hace de manera fácil, rápida y sencilla, por lo que no requieren ningún adiestramiento especial.

Materiales y métodos para la construcción de un biodigestor plástico

La información que se presenta a continuación está basada esencialmente en recomendaciones hechas por vietnamitas, quienes las han aplicado sistemáticamente en toda Indochina, incluso en fincas ecológicas. Los materiales se muestran en la tabla 6.1.

Construcción del biodigestor

Se construye una trinchera para acomodar el biodigestor. Las paredes deben ser firmes y el piso plano o solamente con un mínimo de pendiente. No debe haber piedras con filos cortantes o raíces exteriorizadas en las paredes o el piso. La sección transversal de la trinchera para un biodigestor de 80 cm de diámetro tiene unas dimensiones de 100 cm de ancho en la parte superior, 80 cm en la parte inferior, y 80 cm de profundidad. La longitud depende de la cantidad de excreta disponible. El promedio es de 10 m por la excreta suministrada por dos vacas u ocho cerdos.

Tabla 6.1. Materiales para la construcción de un biodigestor plástico, Sosa Cáceres, et al., 2007.

Descripción	Cantidad
Capa tubular de polietileno transparente de 280 cm de circunferencia (89 cm de diámetro y alrededor de 0.2 mm de espesor ¹)	
Tubo de cerámica de 100 cm de longitud y 15 cm de diámetro interno	2
Manga plástica con 21 mm de diámetro interno	2 m
Adaptador de PVC de 21 mm de diámetro interno (macho y hembra)	2
Zapatilla de goma ² de 10 cm de diámetro y 1 mm de grosor con agujero central de 21 mm de diámetro	2
Zapatilla de PVC de 10 cm de diámetro y 1 mm de grosor con agujero central de 21 mm de diámetro	2
Tubería de PVC con diámetro interno de 21 mm	2 m
Tubo rígido de PVC con 21 mm de diámetro interno o flexible ²	5–20 m
Tiras de goma ² de 5 cm de ancho	4
Botella plástica transparente	1
Codo de PVC de 21 mm de diámetro interno	1
Piezas en T de PVC de 21 mm de diámetro interno	3
Cemento o cola para pegar piezas de PVC	1

1. El grosor puede ser calculado por el peso de una longitud dada del tubo, que normalmente debe ser 1 kg por cada 2 m de longitud.
2. De neumáticos desechados.
3. La longitud depende de la distancia entre la cocina y el biodigestor.

Se cortan dos piezas del tubo de polietileno, cada una de 11 m de longitud (para un biodigestor de 10 m de longitud), se deposita en un sitio plano y se inserta una pieza dentro de la otra.

Se hace un agujero pequeño en las dos capas del tubo plástico, aproximadamente a 1.5 m de uno de los extremos. Se coloca una zapatilla de PVC y otra de goma en el adaptador macho, que a su vez es insertado a través del agujero, de dentro hacia afuera. Se coloca una segunda zapatilla de PVC y otra de goma en el adaptador macho, por la parte de afuera del tubo, y se asegura firmemente con el adaptador hembra. La salida del adaptador hembra se cierra temporalmente

con un pequeño cuadrado de película de polietileno, o cualquier bolsa plástica, y se asegura con una liga de goma.

La tubería de cerámica se inserta en dos tercios de su longitud, dentro de uno de los extremos del tubo de polietileno. La capa plástica se dobla cuidadosamente alrededor de la tubería de cerámica y se asegura con las tiras de goma de 5 cm de ancho. Las bandas se enrollan cuidadosamente hasta cubrir completamente los bordes de la capa de plástico del tubo de polietileno, terminando en el tubo de cerámica. Esta tubería de entrada al biodigestor se cierra temporalmente también con un cuadrado de película de polietileno asegurado con la liga de goma.

Desde el extremo abierto se fuerza la entrada de aire dentro del tubo por oleadas, mediante la agitación de este. Inmediatamente después, el tubo se cierra a unos 3 m de su extremo, de manera que el aire no pueda escapar. El procedimiento de insertar el tubo de cerámica de salida es similar al del otro de entrada, que es lo que se hace a continuación. Este conjunto ya ensamblado se traslada muy cuidadosamente a la trinchera previamente preparada y se deposita en esta. Los tubos de cerámica se inclinan con un ángulo de 45° y se fijan provisionalmente.

Se prepara una válvula de seguridad mediante una botella plástica transparente, una pieza en T y tres tubos de PVC: uno de 6 cm y dos de 30 cm de longitud. Se vierte agua dentro de la botella y se mantiene con una altura de 3 a 5 cm de distancia con respecto a la boca de la botella.

El biodigestor se llena con agua hasta ocupar dos tercios de su volumen, moviendo hacia arriba y hacia abajo la salida. El aire atrapado dentro del tubo de polietileno escapa a través de la válvula de seguridad a medida que aumenta el volumen de agua incorporada al sistema.

En este momento se agrega al sistema la tubería que conduce a la cocina. Tener en cuenta que esta tubería no debe estar sobre el suelo y que la trampa de agua deberá colocarse en el punto más bajo de la línea de gas.

Se puede hacer un reservorio de gas con otra pieza de polietileno de 3-4 m y una pieza de PVC en T. Este reservorio puede colocarse horizontalmente o verticalmente, pero debe ser protegido de la luz solar y se le debe colocar una tira alrededor provista de un

peso suspendido para incrementar la presión. El reservorio de gas se debe colocar dentro de la línea de salida del gas tan cerca de la cocina como sea posible, con el fin de maximizar la velocidad de flujo de gas en los quemadores, puesto que el sistema opera a muy baja presión (solamente 3-5 cm de columna de agua).

Se deben tomar medidas para proteger el biodigestor, y esto se puede hacer fácilmente mediante la preparación de una cerca en derredor, que evita la incursión de los animales en esa área. Además, se recomienda proteger el biodigestor de la luz solar, colocando algún tipo de cobertura sobre el mismo. Todo esto puede facilitarse a veces mediante la siembra de algún tipo de planta que dé abundante follaje.

6.1.5 Lechos de secado

Son estructuras que se emplean para secar los lodos previamente digeridos, producidos en otros procesos biológicos, tales como sedimentadores y fosas sépticas, evaporando e infiltrando el agua que contienen. En el proceso, la evaporación se produce por la acción del sol y la infiltración en camas de arena y grava graduada.

6.2 Lagunas de tratamiento

6.2.1 Lagunas de estabilización

Las lagunas de estabilización constituyen el proceso de mayor aplicación en el tratamiento de aguas residuales municipales en México. Es, asimismo, el método más sencillo en su operación y mantenimiento. Sin embargo, como todo proceso de tratamiento, requiere de una buena operación y mantenimiento para su buen funcionamiento (Conagua, 2015).

Las lagunas de estabilización (figura 6.10) son cuerpos de agua creados artificialmente. Normalmente se construyen de tierra, y presentan un bordo libre de entre 0.5 y 1.0 m, dependiendo del área de la laguna. Se pueden clasificar en lagunas anaerobias (remoción de sólidos y materia orgánica), lagunas facultativas (remoción de materia orgánica y microorganismos patógenos) y lagunas de maduración (remoción de patógenos).

Las lagunas anaerobias son estanques profundos (2-5 m) en los que se lleva a cabo la sedimentación de sólidos y la degradación de la materia orgánica.



Figura 6.10.
 Laguna de estabilización
 (Rivas, s.f.).

Debido a que la fotosíntesis no tiene influencia en el proceso, las lagunas anaerobias pueden estar cubiertas (figura 6.11). Las variables que se deben controlar en este proceso son pH, temperatura y carga orgánica. El efluente de una laguna anaerobia puede presentar una coloración que puede variar entre amarillo a café oscuro y gris oscuro. Una desventaja en estas lagunas es el olor que puede generarse en el caso de recibir una carga orgánica mayor a la de diseño y también si el influente presenta una concentración de sulfatos mayor a 500 mg/l. (CNA-IMTA, 1994). Posterior a esta laguna se puede encontrar una laguna facultativa (Escalante *et al.*, 2000).



Figura 6.11.
 Laguna anaerobia.

Las lagunas facultativas se diseñan para tirantes de entre 1.5 y 2 m. En ellas, el proceso de degradación se lleva a cabo en tres fases: en el fondo de la laguna existen condiciones anaerobias que generan biogás y que producen un ligero mezclado; la fase intermedia, llamada facultativa, la llevan a cabo microorganismos facultativos; en su superficie se lleva a cabo la fase aeróbica, la producción de oxígeno se realiza por medio de las algas que utilizan como fuente de energía la luz solar en el estanque, proveyéndole al agua una coloración verde oscuro brillante (alta concentración de O.D. y pH) y la ausencia de malos olores. Algunas lagunas de estabilización presentan construcción de mamparas, con el objeto de incrementar la eficiencia del proceso, dando un comportamiento de flujo pistón al fluido.

Las lagunas de maduración, también llamadas aerobias, son menos profundas que las facultativas (1–1.5 m) y en ellas deben predominar las condiciones aerobias, la concentración de oxígeno disuelto es superior a la de una facultativa, su objetivo principal es la remoción de microorganismos patógenos. El agua de las lagunas de maduración presenta una coloración verde y ésta libre de olor (ver la figura 6.12, foto izquierda). En la misma figura se presenta una estructura de salida (foto derecha). Generalmente, en un sistema lagunar, las lagunas de maduración se encuentran después de una laguna facultativa (Escalante et al., 2000).



Figura 6.12. Laguna de maduración (foto izquierda), estructura de salida (foto derecha) (Escalante et al., 2000)

Las lagunas de estabilización, en función del lugar que ocupan, se pueden agrupar en primarias, o de aguas residuales crudas, y secundarias, si reciben efluentes de otros procesos. En relación con la secuencia de sus unidades, pueden clasificarse en lagunas en serie o en paralelo, pudiendo existir combinaciones de varios tipos. Los arreglos de un sistema lagunar pueden comprender una única laguna facultativa o lagunas en serie que incluyen anaerobia, facultativa y de maduración. Además, es deseable construir series del mismo tipo para permitir una operación en paralelo. Las lagunas anaerobias pueden ser diseñadas para operar individualmente o en paralelo. Los parámetros de control que principalmente se deben determinar se indican en la tabla 6.2. (Escalante et al., 2000).

Tabla 6.2. Parámetros de control en lagunas de estabilización (Rango normal).

Parámetro	Anaerobia	Facultativa	Maduración
Color	Café	Verde oscuro	Verde oscuro
Olor	Sí	No	No
pH	6.5–7.5	8–9	8–9
Temp. del agua	20–25 °C	20–25 °C	20–25 °C
Temp. ambiente	18–35 °C	18–35 °C	18–35 °C
Oxígeno disuelto	0	> 6 mg/l	6–35 mg/l



COMPOSTEO Y VERMICOMPOSTEO de excretas porcinas



7

7 COMPOSTEO Y VERMICOMPOSTEO DE EXCRETAS PORCINAS

El composteo y vermicomposteo son tecnologías para el tratamiento de residuos sólidos orgánicos, en el caso de las excretas porcinas ayudan en el tratamiento del componente sólido, estabilizándolo, reduciendo el olor desagradable, conservando la materia orgánica y nutrientes.

7.1 Composteo

El composteo es un proceso biológico que convierte residuos orgánicos en biosólidos, por acción de diversos microorganismos. El proceso es aerobio y termofílico, la temperatura puede ir de los 40 a 60 °C y la humedad debe ser de 60 %. Los objetivos de la tecnología son convertir la materia orgánica putrefacta a formas estabilizadas. Eliminar patógenos por medio del incremento de la temperatura durante la descomposición de la materia orgánica y reducir del volumen del residuo al ocurrir procesos de evaporación del agua enlazada y digestión del material orgánico.

El composteo se lleva a cabo en dos etapas:

Digestión aerobia termofílica.-Microorganismos termofílicos elevan la temperatura por encima de los 60°C, provocando la destrucción de los microorga-

nismos patógenos. En esta primera etapa se deben mantener las condiciones aerobias por medio de aeración mecánica volteando la mezcla periódicamente con un cargador frontal o bien con la inyección de aire por medio de un ventilador y un difusor instalado por debajo de la pila. Esta etapa puede durar de un mes a tres meses. Este aumento en la actividad microbiana provoca un aumento en la demanda de oxígeno y un rápido aumento en la generación de calor metabólico, produciéndose temperaturas que se elevan hasta un rango termofílico (50 a 60 °C), 60 °C es el valor máximo deseable para un buen proceso donde hay una reducción de patógenos. Sin embargo, con algunos materiales que tienen mayor capacidad calorífica, la temperatura puede llegar a más de 80°C o más provocando algunos incendios. La temperatura se controla mediante la aeración.

Curado o estabilización adicional (mesofílico).-Consiste en quitar la mezcla del área de composteo y llevarla a otro sitio donde permanecerá en reposo, no requiere de aeración, las temperaturas iniciales son de más de 40 °C, para posteriormente descender a temperaturas mesofílica (temperatura ambiente). Esta etapa asegura la completa estabilización de la composta y la remoción de tóxicos orgánicos. La duración del curado puede ser de 1 a 2 meses, EPA, 1992.

7.1.1 Pilas alargadas o camellones

El material se apila sobre una plataforma o el suelo en montones alargados, figura 6.11. La aeración



Figura 7.1. Pilas alargadas o camellones.

es por medio de mezclado manual o mecánico de la composta, esto permite homogeneizar la temperatura. El Mezclado permite una mayor distribución de nutrientes, agua, aire, contaminantes y microorganismos. La frecuencia del mezclado depende de la actividad microbiana, que puede determinarse por el perfil de la temperatura en la pila, los registros deben ser diarios (EPA 1995). Los camellones están dispuestos al aire libre, de entre 1.5 a 1.8 metros de altura y 2.5 y 4.5 metros de largo. Estos camellones son volcados periódicamente para conservar oxigenadas las pilas, recoger humedad y controlar la temperatura. La degradación tarda de 60 a 90 días, y la madurez entre 45 y 60 días.

7.1.2 Pilas estáticas

La aireación se lleva a cabo por un sistema de inyección (compresor) o extracción (vacío) de aire, mediante tubos colocados en la base, alineados paralela-

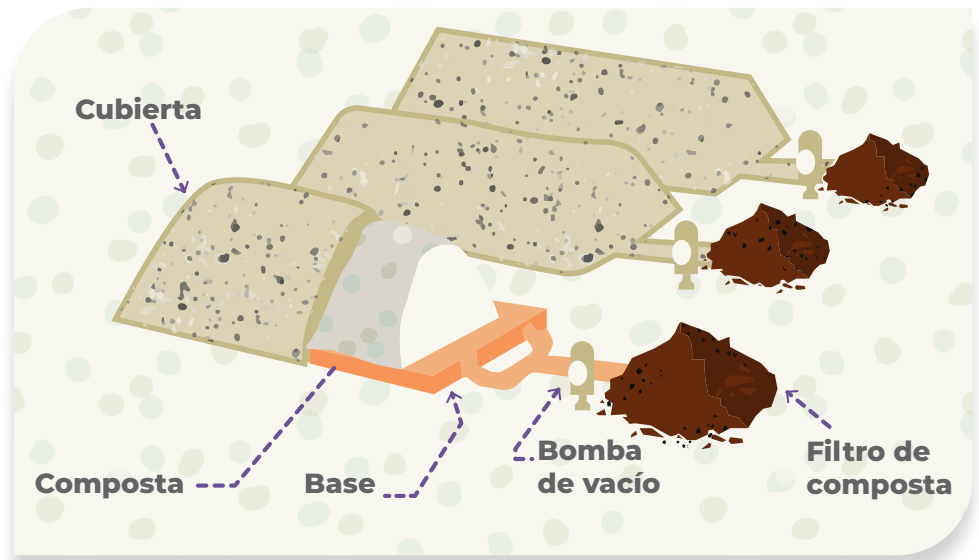


Figura 7.2. Pilas de composta estáticas o de aireación forzada (Tchobanoglous, 2002).

mente a lo largo de la pila. La extracción de aire permite capturar los vapores de compuestos orgánicos volátiles. El sistema permite también el control manual o automático de la velocidad del flujo de aire que provee de oxígeno al proceso de composteo (figura 7.2).

En la figura 7.3 se observa una pila debajo de la cual corren en forma paralela dos difusores que están constituidos por una placa metálica perforada y una canaleta de cemento conectada a un ventilador. En este tipo de difusor también se pueden canalizar lixiviados o precipitación pluvial. También se muestra el monitoreo de temperaturas, que permite comprobar si el proceso está en etapa termofílica. El registro de temperaturas se puede hacer con termopares o bien con termómetros para suelo provistos de un pivote metálico.

La aireación se lleva a cabo por un sistema de inyección (compresor) o extracción (vacío) de aire.



Figura 7.3.
Pila de composteo y monitoreo de temperaturas.

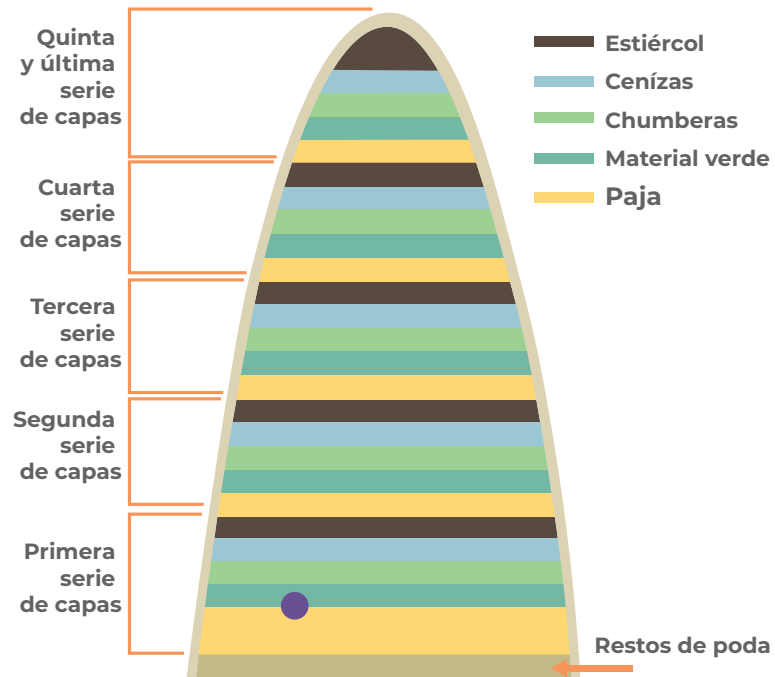
En la figura 7.4 se observan pilas estáticas de 80 toneladas de residuos debajo de cada una de las cuales hay un difusor perforado conectado a un ventilador. La ventilación puede ser por extracción o por inyección.



Figura 7.4. *Pilas estáticas.*

7.1.3 Composteo en capas

Se van colocando los materiales que se deseen compostar en capas, pueden ser residuos de podas, restos de comida, etc. La altura de la composta dependerá del alcance manual del operador (figura 7.5). El proceso se va monitoreando en cuanto a temperatura y humedad.



NOTA: entre serie de capas hay que introducir un poco de composta del año anterior

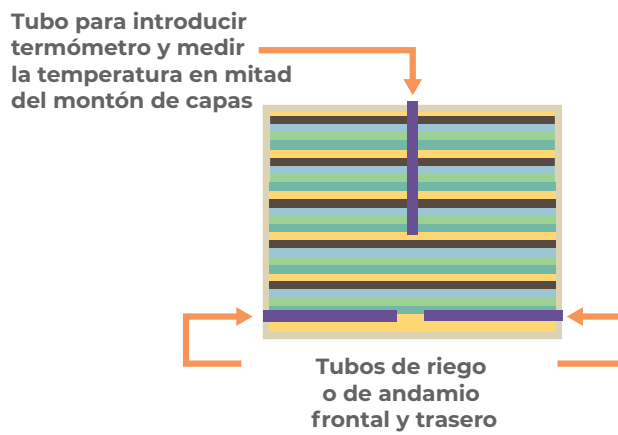
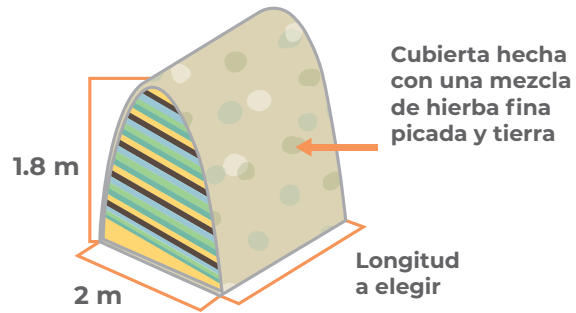


Figura 7.5. Composteo en capas. Autor: Renato Álvarez María (biorganicexperience.com).

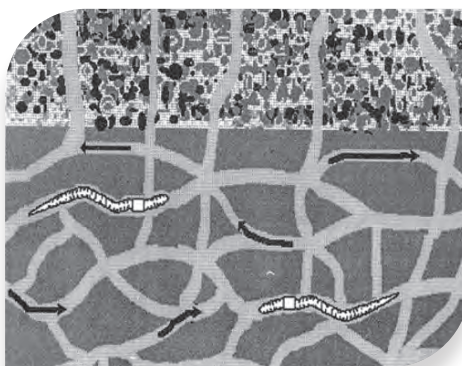
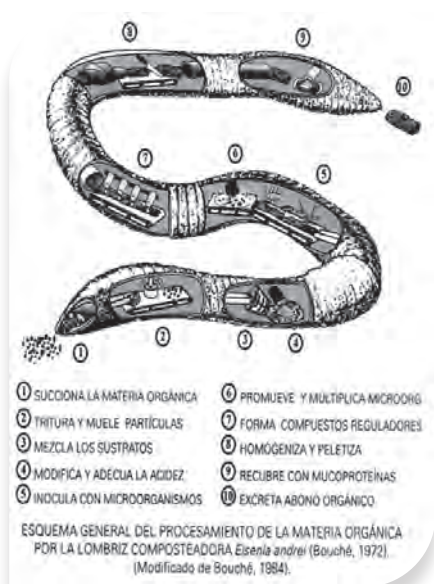
En la figura 7.6 se observa una compostera municipal hecha de bloques de cemento, techada. En la parte lateral tiene unas puertas por donde se mete la mezcla o se saca la composta. El piso de cada galera tiene canaletas por donde se lleva a cabo la ventilación natural. El aire frío entra por la parte de abajo, y el aire caliente sale por arriba. Además, para ayudar a la ventilación se colocaron de manera vertical tubos de PVC perforados en diferentes partes de la mezcla. El material a compostar se va acomodando en capas.



Figura 7.6. Compostera municipal en San Salvador.

7.2 Vermicomposteo

Es un proceso de tratamiento aerobio para la biodegradación de los biosólidos y residuos sólidos municipales. Los objetivos de la tecnología son alcanzar la reducción de patógenos y producir un biosólido con calidad agrícola para ser usado como abono orgánico. La lombriz tiene dos funciones: lleva a cabo una transformación física, ya que movilizan partículas, trituran, mezclan y propician condiciones aerobias, y realizan una transformación biológica en el aparato digestivo de la lombriz por medio del fraccionamiento y desdoblamiento de moléculas y de la síntesis y enriquecimiento enzimático y microbiano (figura 7.7)



Las galerías favorecen la circulación de oxígeno, la ventilación del sistema y la degradación aerobia, lo cual evita la generación de olores. Las lombrices secretan un moco gelatinoso que queda en las paredes lo que favorece el desarrollo de microorganismos.

Figura 7.7. Papel de la lombriz en el vermicomposteo. (Fuente: Capistran, et al. 2001).

7.2.1 Sistemas de producción

Los sistemas de vermicomposteo se dividen en unidades básicas de producción llamadas lechos o camas. Un lecho típico puede tener las siguientes dimensiones de acuerdo con Schuldt (2004): 1 m de ancho, que es el límite de mantenimiento manual (alcance del brazo); 2 m de longitud, y una altura de 40 cm. Un lecho puede consumir, cuando su población de lombrices se encuentra próxima al máximo apiñamiento, unos 100 kg de materia orgánica en base húmeda por mes (0.1 t/mes).

Bollo (2001) propone lechos de 1 m x 20 m x 0.20 m. Cada lecho trata 12 t de alimento, por lo que si se tienen 30 t de residuos mensuales (360 t/año), se necesita instalar 30 lechos, que ocupan un área de 20 m² por lecho. Por lo tanto, se requieren 600 m² solo para el área de vermicomposteo.

Este autor propone multiplicar el área de vermicomposteo por un factor de 2.5 que, de acuerdo con su experiencia, proporciona un valor muy exacto del área total requerida, que en este caso sería de 1,500 m², la cual incluye patio de residuos, calles y pasillos. También se puede partir inversamente: si se tiene una superficie de terreno disponible de 1,000 m², por ejemplo, y se quiere saber cuántos

lechos se pueden instalar en esa superficie, se lleva a cabo este cálculo:

$$(1,000 \text{ m}^2) / (2.5 \times 20 \text{ m}^2) = 20 \text{ lechos}$$

Se tiene, entonces, que en un área disponible de 1,000 m² vamos a poder instalar 20 lechos, en los que vamos a poder tratar 240 toneladas de lodo durante un año.

$$\text{t/año} \times 20 \text{ lechos} = 240 \text{ t de lodo en 20 lechos}$$

7.2.2 Tipos de vermicomposteo

En la primera imagen tenemos una vermicompostera construida con tabicón de cemento, de tres metros de largo por uno de ancho, con 80 cm de profundidad, construida en una granja porcina.

En la figura 7.8 se observa la instalación de una vermicompostera, construida de bloques sobrepuestos. Esta estructura tiene 3 m de largo x 1 m de ancho y 0.70 m de profundidad. Las lombrices se colocaron inicialmente sobre una capa de suelo natural de 10 cm. Posteriormente se fue alimentando semanalmente con una capa de 10 cm de residuos porcícolas. La instalación es sencilla y permite tener aisladas y protegidas a las lombrices.



Figura 7.8. Vermicompostera para residuos porcinos en Jojutla, Mor.

En la figura 7.9 se observa una vermicompostera techada con láminas y construida de tabique y cemento, de 12 m de largo, 70 cm de profundidad y 1 m de ancho, en Nicolás de Ibarra, Chapala, Jal.



Figura 7.9. Sistema de vermicomposteo, Nicolás de Ibarra, Jal.

7.3 Métodos y análisis sugeridos para la composta y vermicomposta

Para evaluar la eficiencia de los procesos de composteo y vermicomposteo y la calidad de los productos, se sugieren los parámetros enlistados en las tablas 7.1 y 7.2.

Tabla 7.1. Parámetros y técnicas de análisis para compostas.

Parámetro	Método
Temperatura	Termopares o termistores
Humedad y sólidos totales	Evaporación
Sólidos volátiles	Ignición
Potencial de hidrógeno	Evaporación
Nitrógeno total	Kjeldahl

Carbón orgánico	Analizador de carbono orgánico total
Nutrientes: Ca, K, Mg y P	Absorción atómica
Densidad aparente	Método de la probeta
Sales solubles: sulfatos, carbonatos, cloruros	Extracto de saturación
Tóxicos orgánicos: plaguicidas, bifelinos, policlorados	Cromatografía de gases
Microorganismos patógenos: coliformes fecales y totales, enterococos, Salmonella, huevos de helmintos	Número más probable, cuenta directa

La estabilidad de la composta o vermicomposta se puede determinar midiendo la respiración microbiana con un espirómetro y el crecimiento y desarrollo de semillas, probando su germinación; mediante la relación carbono-nitrógeno; la determinación de sólidos volátiles y mediante carbono orgánico total.

Los parámetros para el control del composteo y vermicomposteo son sencillos de seguir: se requiere medir diariamente la temperatura; la humedad de la mezcla; el pH; el tamaño de las partículas, que tienen que ser pequeñas para poder presentar una mayor superficie de degradación; la cantidad de poros y densidad, estrechamente relacionados, que son necesarios para proporcionar condiciones aerobias; y la relación carbono-nitrógeno, que es la que va a proporcionar los nutrientes necesarios para el crecimiento microbiano. En la tabla siguiente se presentan estos parámetros.

Tabla 7.2. Parámetros y técnicas de análisis para compostas.

Parámetros básicos	Vermicomposteo	Composteo
Temperatura	13–22 °C	60 °C
Humedad	80–90 %	60 %
pH	6–8	6–8.5

Tamaño de partículas	1.3–7.6 cm (Gray <i>et al.</i> , 1971)
Densidad de la mezcla	0.4–0.6 t/m ³
Porosidad	30–35 % (Haug Roger, 1979)
Relación carbono-nitrógeno inicial	30 o 40:1

7.4 Almacenamiento de compostas y vermicompostas

En la medida de lo posible, no se deben acumular los residuos sólidos crudos; se deben llevar diariamente al área de composteo para evitar la emisión de olores e insectos. Actualmente, en algunas granjas porcícolas, los residuos sólidos, conocidos como cerdaza, se acumulan y son después vendidos a bajos precios, sin ningún tratamiento. Pérez Espejo (2006), comenta que, en la región de la Piedad, Michoacán, durante dos o tres meses al año se activa un mercado para la venta de cerdaza que data de tiempo atrás. Treinta por ciento de los porcicultores venden parte de la cerdaza a los productores de aguacate de la zona de Uruapan. El producto se comercializa sin ningún tratamiento, se transporta con un contenido de humedad muy alto y tiene un precio entre 75 y 80 pesos el metro cúbico. Los ingresos que recibe el porcicultor por este concepto son insignificantes, y lo hacen más con la finalidad de deshacerse de la cerdaza que de obtener un beneficio económico. Algunos porcicultores dejan en manos de sus trabajadores la venta de la cerdaza como un complemento al salario y otros (21 %) regalan la cerdaza. El 36 % de los productores emplean la cerdaza para la alimentación de rumiantes, mayormente bovinos (50 %), aunque también para la de ovinos (16 %). A pesar de que sustituyen entre 20 y 40 % el grano en la dieta de los rumiantes, sólo el 18 % de los porcicultores considera que la cerdaza puede tener un valor comercial como alimento animal o abono orgánico.

El cambio de costumbres y mentalidad es un proceso largo. Sin embargo, si se les dan alternativas a los porcicultores para dar un valor agregados a sus residuos sólidos mediante el composteo y vermicomposteo, se puede lograr por un lado un benefi-

cio para el ambiente y la salud pública, al no usar los residuos crudos, y por otro un beneficio económico.

Las compostas y vermicompostas (biosólidos) requieren de un lugar donde puedan ser almacenadas, preferentemente un espacio techado si está envasada o apilada al exterior en granel. Se debe decidir qué cantidad se va usar para autoconsumo, ya sea para la agricultura o material para camas en las porquerizas, y qué cantidad va a estar disponible para donar o vender, ya que se debe tener en cuenta que la generación de excretas es diaria y la producción de los biosólidos es uniforme y sostenida, mientras que la utilización no siempre presenta la misma periodicidad.

Se debe considerar que una porción de compostas y vermicompostas, las más estabilizadas, se pueden secar, cribar y envasar y otra se puede distribuir a granel. El cribado, que puede ser manual o con una cribadora, tiene como propósito obtener un producto de una granulometría homogénea para poder ser envasado. Al envasar la humedad debe ser menor a 40 % (figura 7.10).

7.5 Diferentes usos de las compostas y vermicompostas

Los usos que se pueden dar a las compostas son diversos: se pueden usar para rellenos sanitarios, como material de cobertura, para camellones en carretera o dentro de la ciudad, en jardines, áreas verdes de edificios y escuelas públicas, en viveros como sustrato de mezclas, para el crecimiento de pasto, en diferentes cultivos agrícolas, y como mejorador de suelos agrícolas y forestales (figura 7.11).

Figura 7.10. Implementos necesarios para comercialización.



Cribadora manual



Cribado mecánico



Vermicompostas y compostas envasadas

Figura 7.11. Usos de las compostas y vermicompostas.



USOS

- Recuperación de terrenos
- Material de cobertura en rellenos sanitarios
- Viveros
- Césped
- Cultivos agrícolas
- Jardines públicos

Áreas

Área de almacén de desechos crudos o precomposteo (residuos tóxicos)

Área de preparación de alimento y mezclado

Área de producción de humus o vermicomposta

Área de composteo y curado

Área de secado, cribado y envasado

Área de almacén de producto a granel y envasado

Figura 7.12. Áreas requeridas para el composteo y vermicomposteo.



APROVECHAMIENTO

AGRONÓMICO DE EFLUENTES
y residuos sólidos porcinos



8 APROVECHAMIENTO AGRONÓMICO DE EFLUENTES Y RESIDUOS SÓLIDOS PORCINOS

8.1 Condiciones óptimas de uso agronómico

La correlación entre el uso agronómico de efluentes y residuos sólidos porcinos y el cuidado del ambiente es sumamente relevante, para lo cual se debe contar con un plan de manejo de las excretas. La ubicación de una granja porcícola debería considerar pendientes del terreno natural, áreas agrícolas cercanas, existencia de cuerpos de agua superficial, profundidad de las napas y proximidad de vecinos y núcleos urbanos, entre otros factores. En la realidad no siempre sucede, pero hay que tener en cuenta el mayor número de normas y recomendaciones para tener buenas prácticas de manejo de estos residuos y sus efluentes.

8.2 Normatividad vigente en México y otros países

Para la aplicación de efluentes y excretas porcinas se deben considerar normas que ya se encuentran vigentes en el país o tomar como referencia la experiencia de otros países, y contemplar aspectos como contaminantes microbiológicos, metales pesados, tóxicos orgánicos, sitios de aplicación, protección al acuífero, etc.

Pérez Espejo, *et al.* (2001) mencionan que en enero de 1997 se publicó la norma NOM-001-SEMAR-

NAT-1996, y en diciembre del mismo año, las modificaciones a la Ley de Ingresos referente al pago de derechos por rebasar límites máximos permisibles (LMP) de la norma. Las granjas con más de 833 vientres, que producen más de tres toneladas al día de sólidos suspendidos totales (Taiganides, 1996), consideradas grandes, que no cumplan con los LMP de la norma al 1º de enero del 2000 tendrán que pagar el derecho correspondiente. El monto del derecho de descarga depende de tres factores: 1) de la magnitud de 16 de los contaminantes establecidos en la norma, por los cuales la Ley Federal de Derechos en Materia de Agua (LFDMA) establece un pago, 2) del volumen de agua utilizado y 3) del tipo de cuerpo receptor. En realidad, el monto del derecho va a depender de la eficiencia en el manejo de la granja y de la eficiencia del sistema de tratamiento. En granjas grandes se tendría que pagar un derecho a pesar de haber invertido en un sistema de tratamiento, cuando en alguno de los 16 parámetros la norma 001 y la LFDMA esté por encima de los LMP. Si la granja descarga a un cuerpo receptor, lo más probable es que se tenga que pagar por rebasar los LMP de SST, DBO o nitrógeno (N). Si la granja grande descarga a un terreno propio para riego agrícola, tendrá que pagar un derecho por rebasar el LMP para coliformes fecales (CF). Esta autora plantea que la estrategia ambiental de la NOM-001 no es la más adecuada para el caso de la porcicultura. Primero, porque es una norma genérica que no distingue las peculiaridades de cada actividad; segundo, porque productores y autoridad difícilmente pueden hacerla cumplir: la autoridad no cuenta con los recursos humanos y presupuestales para vigilar la norma, y los productores saben que no importa cuánto tiempo y dinero dediquen a mejorar la calidad de la descarga, nunca van a poder cumplir la calidad exigida. descarga, nunca van a poder cumplir la calidad exigida por la norma 001.









Tabla 8.1. Normas vigentes mexicanas aplicables a los residuos sólidos y efluentes porcícolas.

Norma	Aspectos relevantes
NOM-001-SEMARNAT-1996	El objetivo de esta norma es proteger la calidad del agua y bienes nacionales, revertir su deterioro y posibilitar los usos posteriores del agua. Regula el cuerpo receptor, pero no la actividad que realiza la descarga. Establece para todas las actividades los mismos límites máximos permisibles para 20 parámetros de contaminación, en función del cuerpo receptor y del uso del agua: riego agrícola, abasto público urbano, explotación pesquera, etc.
NOM-004-SEMARNAT-2002	Esta norma oficial mexicana establece las especificaciones y los límites máximos permisibles de contaminantes en los lodos y biosólido provenientes del desazolve de los sistemas de alcantarillado urbano o municipal, de las plantas potabilizadoras y de las plantas de tratamiento de aguas residuales, con el fin de posibilitar su aprovechamiento o disposición final y proteger el medio ambiente y la salud humana.

8.3 Buenas prácticas de manejo y utilización de efluentes y residuos sólidos porcinos

Las buenas prácticas, normas o criterios que rigen en otros países son orientativas, no aplicables a nuestra normatividad, pero nos pueden dar una idea de qué factores se deben tomar en cuenta para el uso de los residuos de los lodos, efluentes y residuos porcinos, para evitar la contaminación.

Maisonnave *et al.* (2016) recomiendan aplicar las excretas y efluentes al terreno solo si se cumplan las siguientes condiciones, la mayoría reconocidas buenas prácticas de utilización de nutrientes (BPUN):

-  La humedad del suelo se encuentra por debajo de capacidad de campo.
-  El momento de siembra del cultivo es próximo.
-  No se prevén precipitaciones en el pronóstico meteorológico cercano.
-  Los vientos son de moderados a bajos y nunca soplan en dirección a vecinos cercanos, rutas o caminos de alta circulación.
-  Existe disponibilidad de equipo de aplicación correctamente calibrado.
-  Existe una carencia de nutrientes en el suelo que puede ser satisfecha mediante el agregado de excretas porcinas.

La topografía de los terrenos debe carecer de pendientes extremadamente pronunciadas, sugiriendo que sean menores al 10–15 %, según la textura y grado de cobertura de los mismos. La construcción de terrazas para sistematizar un terreno agrícola constituye una jerarquizada BPUN por su impacto en la protección de las aguas superficiales.

Los terrenos deben estar lo más alejados posible de cuerpos de agua superficiales, como arroyos, riachos o inclusive humedales definidos, así como de pozos de bombeo para provisión de agua para consumo humano y animal. De no ser este el caso, podrán implementarse distintas BPUN.

8.3.1 Protección de ambientes riparios

Maisonnave, *et al.* (2016) también mencionan que se deben proteger los ambientes riparios, ya que son ecosistemas frágiles que se encuentran en el ecotono tierra-agua. Generalmente, su vegetación se compone de árboles, arbustos y especies herbáceas. Naturalmente, actúan como zonas *buffer* protegiendo los cursos de agua a la vez que se constituyen en hábitats para un número significativo de mamíferos y aves. Deben protegerse del pastoreo animal para permitir que cumplan su función natural de filtro de aportes de material aguas arriba.

8.3.2 Franjas de filtro vegetal o *buffers*

Maisonnave, *et al.* (2016) mencionan que se deben establecer franjas de filtros de vegetación que se ubiquen entre los cuerpos de agua y la zona de aplicación de excretas, debido a que son eficientes filtrando sedimentos, materia orgánica, nutrientes y compuestos químicos de la lámina de escorrentía. Para conservar su eficiencia, estos filtros o *buffers* deben ser mantenidos apropiadamente (*Natural Resources Conservation Service*, 2008).



Figura 8.1. Franjas de filtro vegetal o *buffers*, Universidad del Estado de Ohio (*Ohio State University*).

En los diferentes estados de la Unión Americana existen criterios para aplicar el lodo residual de plantas de tratamiento de aguas residuales; sin embargo, pueden proporcionar una idea de cómo pueden ser aplicados otro tipo de residuos, como los porcícolas, para no afectar al medio ambiente. A continuación, se proporcionan algunos de estos criterios:

8.3.2.1 Profundidad del acuífero

Para proteger el acuífero, solo diez estados de la Unión Americana tienen restricciones para la aplicación del lodo: Maryland y Wyoming, 0.6 m; Massachusetts y Nevada, 1.22 m; California, 1.52 m; New Hampshire y Vermont, 1.83 m; Colorado, 3.05 m. Minnesota requiere de 0.20 m de capacidad de retención de agua arriba de la altura estacional del espejo del agua, y Carolina del Sur exige consideraciones sobre la hidrogeología para establecer las condiciones de diseño del sistema de disposición. Estas restricciones evitan que las aplicaciones del lodo no controladas provoquen un exceso de contaminantes disponibles en el primer o segundo año después de su aplicación.

Un acuífero estacional requiere de menor protección. Para lograr una protección adicional, si el acuífero está inmediatamente bajo el sitio de aplicación, se deberá considerar el monitoreo que se marca en la 40 CFR, parte 257. Este requiere que la aplicación del lodo no contamine el acuífero, que es una fuente de agua de consumo humano, con nitratos en concentraciones iguales o mayores que 10 mg/l y sólidos disueltos mayores que 10,000 mg/l.

8.3.2.2 Distancia de los sitios de aplicación a aguas superficiales

Para proteger las aguas superficiales de la contaminación que pudiera ocasionar la aplicación de lodo en el suelo, se tienen varias recomendaciones relacionadas con la pendiente del sitio.

Tabla 8.2. Porcentajes de pendientes para la aplicación de lodo residual.

Pendiente	Comentarios
0-3 %	Es ideal, no es propicia para escurrimientos o erosión del lodo líquido o con un porcentaje de sólidos mayor.
3-6 %	Aceptable, riesgo ligero de erosión. Se requiere que el lodo sea inyectado en el suelo, si es líquido, excepto en aquellos casos en que el terreno tiene un drenaje deficiente. Es más recomendable la aplicación de lodo desaguado.
6-12 %	Se requiere que el lodo sea inyectado en el suelo, si es líquido, excepto en aquellos casos en que el terreno tiene un drenaje deficiente. Es más recomendable la aplicación de lodo desaguado.
12-15 %	No se recomienda aplicación de lodo líquido sin un debido control de escurrimientos, es más recomendable la aplicación de lodo desaguado, pero con su inmediata incorporación al suelo.
>15 %	Pendientes mayores de 15 % son recomendables sólo cuando el suelo tiene una buena permeabilidad y donde la longitud de la pendiente es corta y constituye la menor parte del área total de aplicación.

Fuente: EPA, 1988

8.3.2.3 Distancia a pozos

Con el fin de proveer un margen de seguridad para los pozos que abastecen zonas urbanas o agrícolas, se deberá considerar una distancia mínima del sitio de aplicación al pozo más cercano de 300 a 1,500 pies (91.44 a 457.2 m).

8.3.2.4 Planicies de inundación

La EPA (1988), recomienda que la aplicación del lodo no se lleve a cabo durante los eventos de tormenta cuando la precipitación exceda de $\frac{1}{4}$ de pulgada por hora (0.63 cm). Este criterio también se aplica a suelos congelados o cubiertos por nieve. Por otra parte, si se combinan restricciones de pendientes y control de escurrimientos se protege el agua superficial.

8.3.2.5 Proximidad a áreas recreativas

Se debe prohibir la aplicación del lodo que no ha sido tratado por un proceso de reducción adicional de patógenos (PRAP) a 300 pies (91.44 m) en áreas de uso público (lodo clase A). Asimismo, se deben poner señales para establecer que se ha aplicado lodo. El lodo que ha sido tratado por un PRAP no requiere de área amortiguadora o control de acceso. (EPA, 1988).



Figura 8.2. Áreas recreativas.

8.4 Porcentajes agronómicos

Para el uso agrícola se asume que el lodo debe ser aplicado en porcentajes agronómicos (EPA, 1986). Estos se definen como los porcentajes de composta anual, en los cuales el nitrógeno y/o fósforo suministrados y disponibles al cultivo no excedan los requerimientos anuales de ese cultivo. Esta recomendación es válida siempre y cuando la concentración de contaminantes presentes en los lodos no exceda la establecida en las normas. De no ser así, deben considerarse las recomendaciones hechas para cada tipo de contaminante y las proporciones en las que se encuentra.

8.4.1 Nitrógeno y fósforo

Para calcular la cantidad de nitrógeno y fósforo que debe aplicarse en el suelo se consideran los valores en porcentaje de nitratos (NO_3^-), ion amonio (NH_4^+) y nitrógeno (N_0) del lodo. Debe tomarse en cuenta que a diferencia de los fertilizantes minerales, en el lodo ocurre un proceso de mineralización que provee de nitrógeno durante el primer año y los años subsecuentes.

Procedimiento para calcular la cantidad de lodo que puede ser aplicado al suelo de acuerdo con los porcentajes agronómicos:

$$Nd = C [(NO_3) + kv (NH_4) + F (0-1) (N_0)] 10$$

Donde:

Nd = contenido de nitrógeno en el lodo, kg/ha

C = composta disponible, aquí se considera 1 ton

NO₃ = porcentaje de nitrato en el lodo

Kv = factor de volatilización 1.0, suponiendo que el lodo es incorporado al suelo y de esa manera se evita la pérdida de nitrógeno amoniacal por volatilización, que podría llegar a ser hasta del 50 %, lo cual alteraría este factor.

NH_4 = porcentaje de ion amonio

F = factor de mineralización para el nitrógeno orgánico en el primer año, expresado como una fracción (para la composta es de 10 %).

N_0 = Porcentaje de nitrógeno orgánico

Si consideramos los siguientes valores para una composta, tenemos que:

$NO_3 = 0$

$NH_4 = 2.5 \%$

$N_0 = 5$

El desarrollo sería:

$$Nd = 1 [(0) + 1 (2.5) + (0.1) (5.0)]10 = 30 \text{ kg Nd Ton}$$

Como el lodo que es aplicado sigue un proceso de mineralización durante el primer año y los subsecuentes, se debe calcular el nitrógeno remanente y considerarlo en las siguientes aplicaciones.

Suponemos, como en el ejemplo anterior, que tenemos una tonelada de lodo con 5 % de nitrógeno orgánico. Los factores para la mineralización del lodo son los siguientes:

Factores de mineralización

Año	F
0-1	0.10
1-2	0.05
2-3	0.03

Tenemos entonces, que el nitrógeno remanente puede ser calculado con la siguiente ecuación:

$$N_0 = (0.05) (1 \text{ ton/ha}) (1000 \text{ kg/ton}) = 50 \text{ kg Nd Ton}$$

Proceso de mineralización en tres años:

Nitrógeno orgánico

Primer año = $(0.10) (50 \text{ kg/ha}) = 5 \text{ kg/ha}$

Segundo año = $50 - 5 = 45$
 $(0.05) (45) = 2.25 \text{ kg/ha}$

Tercer año = $45 - 2.25 = 42.75$
 $(0.03) (42.75) = 1.3 \text{ kg/ha}$

De acuerdo con los requerimientos de nitrógeno de un cultivo dado, y el nitrógeno en la composta, se pueden calcular las toneladas de composta que es necesario aplicar:

$$\text{Lodo (ha)} = x = \frac{N - \text{requerida (Kg } \frac{\text{ha}}{\text{año}})}{N - \text{disponible (} \frac{\text{Kg}}{\text{Ton}})}$$

Si se considera que un cultivo de maíz requiere 190 kg de nitrógeno por hectárea por año, y el lodo que se va a aplicar tiene 30 kg de Nd por tonelada, tenemos que:

$$\text{Lodo (ha)} = x = \frac{190 \text{ (Kg N } \frac{\text{ha}}{\text{año}})}{30 \text{Nd (} \frac{\text{Kg}}{\text{Ton}})}$$

La dosis de lodo puede ser calculada para el fósforo siguiendo el mismo procedimiento:

$$\text{Lodo (ton/ha)} = x = \frac{F - \text{requerido (Kg F } \frac{\text{ha}}{\text{año}})}{F - \text{disponible (} \frac{\text{kg}}{\text{Ton}})}$$

8.4.2 Aplicación de acuerdo con la concentración máxima de contaminantes

Para no superar los niveles de concentración considerados en la normatividad, se calcula la dosis de lodo de acuerdo con la siguiente ecuación modificada de Lester (1987^a):

$$\text{Lodo (ha)} = \frac{(N - n)(P)}{(F)(T)(A)}$$

Donde:

- N** = concentración máxima permisible de cada elemento en el suelo (ppm o mg/kg)
- n** = concentración del elemento en el suelo (ppm o mg/kg)
- P** = peso de una hectárea de suelo, considerando una densidad aparente de 1 g/ml y una profundidad de 20 cm (se expresa en toneladas)
- F** = frecuencia anual de aplicación de lodo
- T** = concentración de cada elemento en el lodo (ppm o mg/kg)
- A** = número de años de aplicación del lodo

8.5 Recomendaciones generales para la aplicación de agua y residuos sólidos porcícolas

- Caracterización microbiológica y fisicoquímica
- Selección de sitios de aplicación
- Pláticas con productores
- Caracterización de suelos
- Selección de cultivos
- Programa de aplicación y monitoreo
- En conjunto con los productores agrícolas y porcícolas, elaborar una guía técnica para el de este tipo de residuos



MUESTREO DE EFLUENTES

líquidos y sólidos



9

9 MUESTREO DE EFLUENTES LÍQUIDOS Y SÓLIDOS

Como se ha mencionado en capítulos anteriores, las descargas de excretas y aguas residuales de las granjas porcícolas son altamente contaminantes para cualquier tipo de cuerpo receptor, además de ser fuertes contribuyentes de GEI. De estas descargas, son pocas las que pasan por una planta de tratamiento y son pocos los efluentes de estas que cumplen con la normatividad vigente.

Se toman muestras para hacer el análisis de la calidad del agua con el objetivo de conocer las características del agua residual a tratar y, cuando existe sistema de tratamiento, para seguir y evaluar el funcionamiento y la eficiencia de la planta de tratamiento de aguas residuales (PTAR) y el cumplimiento de la normatividad aplicable.

Si se realiza tratamiento de lodos residuales y excretas, estos también deben de ser muestreados y analizados en los parámetros que marca la normatividad, para su adecuada disposición o reutilización.

Los aspectos técnicos de un muestreo confiable son la determinación del sitio que represente al total de la descarga, la precisión con que el personal de la brigada ejecute la toma de muestras, el uso de equipos y materiales adecuados para la toma de muestras, la preservación de las mismas y el transporte seguro. Para ello se deberán satisfacer los requisitos de las siguientes normas:

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.

Norma Mexicana NMX-AA-003-SCFI-1980. Aguas residuales - Muestreo.

Norma Oficial Mexicana NOM-004-SEMARNAT-2002, Protección ambiental. Lodos y biosólidos.- especificaciones y límites máximos permisibles de contaminantes para su aprovechamiento y disposición final.

El primer paso para garantizar resultados óptimos es un muestreo confiable, y un componente esencial es la determinación del sitio en el que se tomarán las muestras. Solo cuando las muestras son tomadas en el sitio que representa el total de la descarga, con el equipo adecuado y con las precauciones necesarias para no contaminarlas y la preservación de las muestras de acuerdo con los procedimientos establecidos, se podrá asegurar que son representativas. Además, las muestras deben identificarse de forma clara y transportarse de manera segura para asegurar su rastreabilidad y su integridad física para su entrega al laboratorio. Para que tengan validez oficial, la toma, preparación, conservación y transporte de las muestras debe efectuarlas un muestreador acreditado.

La siguiente etapa es la determinación de contaminantes en la descarga. Para ello se requiere de un laboratorio acreditado ante la Entidad Mexicana de Acreditación (EMA) y aprobado por la Comisión Nacional del Agua (Conagua), quienes aplicarán los procedimientos normalizados y llevarán un estricto control de calidad del muestreo y de las pruebas que realicen.

Para mayor información de cómo se realiza un muestreo se puede consultar el anexo de muestreo y la Serie Autodidáctica de la medición de la Calidad del Agua de la Subdirección General de Administración del Agua (Conagua y Coordinación de Tecnología Hidráulica, IMTA). En el anexo 2 se proporciona más información referente al muestreo.

Número de ISBN	Título
968-7417-82-X	Fundamentos técnicos para el muestreo y análisis de aguas residuales
968-7417-85-4	Muestreo y preservación para coliformes fecales y huevos de helmintos
968-7417-83-8	Muestreo y preservación de grasas y aceites, y determinación en campo de pH, temperatura y materia flotante
968-7417-88-9	Aforos de descargas
968-7417-84-6	Muestreo y preservación de parámetros fisicoquímicos
968-7417-89-7	Riesgo y seguridad en el muestreo y análisis de aguas residuales



DIMENSIONAMIENTO DE SISTEMAS

DE TRATAMIENTO PARA
aguas residuales porcinas



10

10

DIMENSIONAMIENTO DE SISTEMAS DE TRATAMIENTO PARA AGUAS RESIDUALES PORCINAS

10.1 Criterios para el dimensionamiento de digestores anaerobios para granjas porcinas

La composición del purín (estiércol más heces) de cerdo varía según la edad del animal, su raza y el tipo de alimentación que recibe. El contenido de masa seca (sólidos totales) y de masa volátil (sólidos volátiles) del purín varía considerablemente según el tipo de explotación. Las diferencias en las aportaciones de agua son más altas en purines procedentes de granjas de cerdas (madres para la producción de lechones) y más bajas en granjas de engorda; sin embargo, en estas también hay mucha variabilidad según el tipo de alimentación y bebederos utilizados). Generalmente, el contenido de masa seca es del orden del 3.5 %, dependiendo de la alimentación que reciba el animal.

La producción de biogás dependerá del contenido de masa volátil. El porcentaje de sólidos volátiles de la masa seca llega hasta un 95 %.

En instalaciones donde no se usa agua para el lavado de pisos, la producción de biogás puede ser de hasta 25 m³/t de purín de cerdo. En instalaciones donde se lavan los pisos, la producción de biogás oscila entre 15 y 20 m³/t de purín de cerdo. El agua de lavado de pisos que se mezcla con el purín no aporta nada a la producción de biogás, e incrementa el tamaño del biodigestor. La mezcla de agua y purín que entra al digestor no debe exceder de un contenido de agua mayor al 94 % (6 % de masa seca).

t=tonelada

Tabla 10.1. Características del purín de cerdo (Moncayo,2020).

Parámetro	Unidades	Purín sin diluir
Sólidos totales (ST)	%	6.5
Sólidos volátiles (SV %)	%	4.9
DQO	mg/l	≥ 12,000
Nitrógeno orgánico	mg/l	1,800
Nitrógeno amoniacal	mg/l	3,400
Fósforo	mg/l	2,300
Biogás	m ³ /t SV	340-650

10.1.1 Consideraciones técnicas para el dimensionamiento de digestores anaerobios

El sistema de digestión anaerobia para el que aplican las presentes especificaciones técnicas es aquel que procesa residuos orgánicos procedentes de establos o granjas porcícolas (Sagarpa, 2010). Este sistema consiste en un proceso centralizado, procedente de animales de granjas en explotaciones tecnificadas con poblaciones en diferentes etapas de crecimiento, por lo que, para la determinación de la masa de generación de excretas, se deberá incluir en los cálculos esa variación.

El proyecto de diseño de los digestores anaerobios debe considerar si el biogás y los biosólidos se van a utilizar como fertilizantes o acondicionadores de suelo. Con base en esa decisión se debe cuantificar el sustrato y calcular la cantidad generada de biogás y biosólidos para saber si es factible su utilización en los requerimientos de biogás o energía y los usos o forma de aprovechamiento del digestato (lodo del digestor).

Los factores base que se consideran en el diseño de los digestores son:

1. Tipo y disponibilidad del sustrato
2. Características fisicoquímicas y microbiológicas del sustrato
3. Aspectos geográficos de la zona

El volumen del digestor depende de la cantidad y tipo de sustrato y de la temperatura ambiente, ya que influyen directamente en la carga orgánica volumétrica (COV) y en el tiempo de retención hidráulico (TRH).

El dimensionamiento de la planta de tratamiento comprende el cálculo de las siguientes estructuras:

- Tanque de alimentación (opcional)
- Digestor anaerobio
- Estructuras de entrada y salida del digestor
- Sistema de deshidratación de lodos
- Sistema para el quemado o aprovechamiento del biogás.
- El efluente del biodigestor requiere de un tratamiento posterior para cumplir con los límites máximos permisibles (LMP) de descarga para su reutilización, que generalmente es en riego agrícola.

10.1.1.1 Determinación del sustrato y características

La cantidad de sustrato generada en cada granja se debe calcular con base en la capacidad total de la granja (número de cerdos o de unidades productivas) y considerando las tasas de nacimiento, mortalidad, entradas y salidas por compra-venta, entre otras. Ejemplos de cálculo de sustrato para granjas porcícolas se pueden consultar en Semarnat, Sagarpa, Firco (2010), Martí Herrero J.(2019).

Para efecto de esta guía se considerarán las siguientes características del sustrato:

Tabla 10.2. Características de las aguas residuales porcinas de granjas de engorda (Garzón Zúñiga y Buelna, 2014).

No. de cerdos	DQO (mg/l)	DBO ₅ (mg/l)	SST (mg/l)	SSV (mg/l)	Nt (mg/l)	NTK (mg/l)	N-NH ₄ (mg/l)	N-(NO ₂ ⁻ + NO ₃ ⁻) (mg/l)	Pt (mg/l)	pH	CF (NMP/100ml)	DBO/DQO
1,000	3,478	996	942	672	524	524	200	0.13	274	7.8	1.60E+06	0.3
5,000	19,344	9,613	10,125	7,875	1,515	1,515	1,500	0.13	76.7	7.06	4.60E+04	0.5
10,800	40,498	15,061	25,034	19,334	1,048	1,048	844	0.13	430.1	6.65	1.60E+09	0.4

Tabla 10.3. Datos iniciales de caudal para la estimación del dimensionamiento de digestores anaerobios.

No. de cerdos en granjas	l/d, por cerdo ¹	Caudal a tratar (m ³ /d)
1,000	20	20
5,000	14	70
10,000	9	90

10.1.1.2 Aspectos geográficos

Para el dimensionamiento del biodigestor se considerarán las condiciones climáticas locales de donde se instalará cada proyecto en específico, como la temperatura ambiental, por ejemplo.

Se deben recopilar y analizar las temperaturas mínima, media y máxima del medio ambiente, ya que estas tendrán gran influencia en la selección del tiempo de retención. Con base en estos datos se determinará una temperatura media mensual que servirá como para establecer el tiempo de retención hidráulico para la eficiente degradación de la materia orgánica (Sagarpa, 2013).

10.1.1.3 Tiempo de retención hidráulico (TRH)

Se define como el tiempo requerido para que el sustrato dentro del digestor degrade la materia orgánica y produzca biogás. El TRH para digestores batch o lote (una carga–una descarga) es igual al tiempo de permanencia del sustrato en el digestor. En los digestores continuos y semicontinuos, el TRH se define como el valor en días del cociente entre el volumen del biodigestor y el flujo o caudal de alimentación.

$$TRH = V/Q$$

Donde:

TRH: tiempo que dura el sustrato en el digestor (d)

V: volumen útil del digestor (m³)

Q: flujo o caudal alimentado al biodigestor (m³/d)

El TRH se determinará para cada proyecto en particular, y considerará la carga orgánica, así como la temperatura del influente y la del medio ambiente.

Para el caso de las condiciones climáticas promedio de nuestro país, se considera que el TRH será de alrededor de treinta días, para alcanzar un mínimo de 60 % de destrucción de los sólidos volátiles. En aquellas zonas donde el promedio mensual de temperatura sea más bajo o alto que el promedio, se deberán considerar para el cálculo del TRH los parámetros descritos anteriormente (Sagarpa, 2013). En la tabla 10.4 se muestra la relación entre temperatura y tiempo de retención recomendada para digestores sin calentamiento.

Tabla 10.4. Relación entre temperatura y TRH recomendado para digestores sin calentamiento (Martí Herrero J, 2019).

Temperatura (°C)	Tiempo de retención hidráulico (TRH) en días
35	25–30
30	30–40
25	35–50
20	50–65
15	65–90
10	90–125



Para la península de Yucatán, con una temperatura promedio anual entre 25 y 27 °C, se recomienda un TRH de 34 días para alcanzar el 60 % de reducción de sólidos volátiles del sustrato en el biodigestor (Sagarpa y Firco, 2013).

10.1.1.4 Carga orgánica volumétrica

La carga orgánica volumétrica (COV) se define como la cantidad de sustrato volátil (en kg) que se alimenta diariamente por cada m³ de biodigestor. La COV es un factor determinante para el dimensionamiento del biodigestor. Es muy importante seleccionar correctamente la carga orgánica volumétrica para el correcto funcionamiento del proceso.

La COV se determina con la siguiente expresión:

$$COV = \frac{m}{V}$$

Donde:

- COV:** carga orgánica volumétrica, kg SV/m³ d
- m:** masa de sólidos volátiles por día (kg SV), kg/d
- V:** volumen del biodigestor (m³)

Para digestores se recomiendan COV en rangos de 2.0 – 2.5 kg SV/m³. d (Moncayo, 2020).

10.1.1.5 Volumen del digestor

El volumen del digestor debe ser igual al volumen del material a degradar multiplicado por el tiempo de digestión necesario y un volumen adicional para el almacenamiento de gas. (Sagarpa, 2013).

$$V = \frac{Q}{TRH}$$

Donde:

- V:** volumen del biodigestor (m³)
- Q:** flujo o caudal (m³/d)
- TRH:** tiempo de retención hidráulico (d)

El volumen del digestor debe considerar un volumen adicional para el almacenamiento del biogás, y se recomienda un 20 % adicional.

$$Vt = Vr + Vb$$

Donde:

- Vt:** volumen total del digestor (m³)
- Vr:** volumen del digestor (m³)
- Vb:** volumen del biogás (m³), generalmente 0.2Vr

10.1.1.6. Volumen de biogás

La producción de biogás depende de la composición del sustrato: grasas, hidratos de carbono y proteínas.

La producción de biogás se estima entre 0.2 y 0.4 m³/kg SV (Moncayo, 2020).

Poder calorífico del biogás: 23.3 MJ/m³ (Von Sperling y Chermicharo, 2005).

Tabla 10.5. Producción de biogás por cerdo de 70 kg (Moncayo, 2020).

Peso por animal vivo	70	kg
Producción de sustrato (estiércol)		
Masa total	5.88	kg/d
Masa seca (sólidos totales)	0.77	kg/d
Masa volátil (sólidos volátiles)	0.6	kg/d
Sustrato total (kg/d)	0.084	kg sustrato/kg animal vivo
Producción de biogás	0.334	m ³ /d
Producción de energía	0.09	kW/d
Biogás/kg de sustrato	56.77	l/kg sustrato por día
Energía kg/sustrato	15.3	W/kg sustrato por día
biogás/kg de animal	4.77	l/kg animal por día
Energía/kg de animal	1.29	W/kg animal por día

Los digestores anaerobios más utilizados para las granjas porcícolas son los digestores tipo laguna cubierta (DLC) y los digestores completamente mezclados (DCM). A continuación, se calcula el volumen y el área requerida para la construcción de digestores tipo laguna cubierta y completamente mezclados.

10.1.2 Estimación del volumen y del área requerida para la construcción de digestores tipo laguna cubierta (DLC)

Los digestores tipo laguna cubierta son estructuras en forma de tronco de pirámide invertida que pueden construirse enterradas o semienterradas, y cuentan con una cubierta para aislarse del medio ambiente, propiciar condiciones anaerobias y para almacenar el biogás.

Se recomienda que los DLC tengan entre 3 y 5 m de profundidad, y para un mejor control de la operación en plantas pequeñas se recomienda que se construyan para una capacidad de entre 240 y 1,600 m³ y con capacidad de producción de biogás de entre 150 y 1,150 m³ por día. (Sagarpa y Firco, 2013). La figura 10.1 es un esquema del sistema formado por un tanque de entrada para homogeneización del sustrato, la laguna cubierta o digestor, un tanque o laguna para el almacenamiento del efluente y un sistema para el quemado o aprovechamiento del biogás.

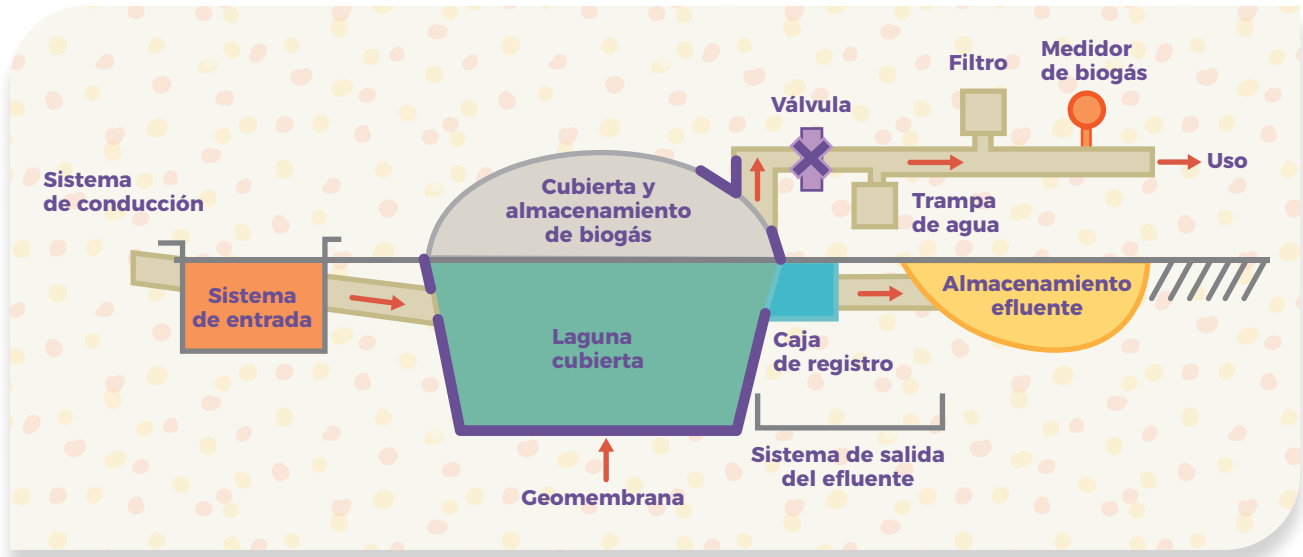


Figura 10.1. Esquema del digestor tipo laguna cubierta para tratamiento de desechos de granjas y establos. <https://autoconsumo.minenergia.cl/wp-content/uploads/2017/08/Biodigestor-de-Laguna-cubierta-Cubierta.png>

10.1.2.1 Estimación del volumen del digestor tipo laguna cubierta (DLC) para granjas de 1,000, 5,000 y 10,000 cerdos

Cálculo del volumen del digestor y producción de biogás a partir de los datos de las tablas 10.2 y 10.3.

Se realizan tres ejemplos para granjas de 1,000, 5,000 y 10,000 cerdos. Los volúmenes requeridos, la estimación de la producción de biogás y la reducción de materia orgánica y de patógenos se muestran en las tablas 10.6, 10.7 y 10.8.

Tabla 10.6. Estimación del volumen del DLC para granjas de 1,000, 5,000 y 10,000 cerdos.

Cerdos	l/d por cerdo	Q (/m ³ /d)	TRH (d)	Vr (m ³)	Vt (m ³)
1,000	20	20	34	680	816
5,000	14	70	34	2,380	2,856
10,000	9	90	34	3,060	3,672

Vr, Volumen del biodigestor; Vt, Volumen total.

Tabla 10.7. Estimación de la producción de biogás para granjas de 1,000, 5,000 y 10,000 cerdos.

Cerdos	l/d por cerdo	Q (m ³ /d)	SST (kg/m ³)	MS (kg/d)	SSV (kg/m ³)	MV (kg/d)	Biogás (m ³ /d)	Metano (m ³ /d)
1,000	20	20	0.942	18.84	0.672	13.44	4.0	2.5
5,000	14	70	10.125	708.75	7.875	551.25	165.4	99.3
10,000	9	90	25.034	2,253.0	19.334	1740.0	522	313.2

MS, masa seca; MV, masa volátil; producción de biogás= 0.33 m³/kgMS; contenido de metano en el biogás, 60 %.

Durante el proceso de tratamiento se estima una remoción de DBO del 70 %, una remoción de DQO 1.5 mg/l por mg/l de DBO5 removida, una reducción de sólidos volátiles del 60 % y una reducción de coliformes fecales de 2 logaritmos (Akunna, 2019).

En la tabla 10.8 se muestran las características del efluente o agua residual tratada que sale del proceso de digestión anaerobia. En la misma tabla y en la figura 10.2 se observa que el efluente del DLC requiere de un tratamiento posterior para reutilizarse ya sea dentro o fuera de la granja, al no cumplir con el LMP de coliformes fecales que indica la NOM-001-SEMARNAT-1996 para uso en suelos. Los postratamientos más utilizados son las lagunas de estabilización con criterios de remoción de patógenos y los humedales (Moncayo, 2020).

Tabla 10.8. Concentraciones del influente y efluente después del tratamiento.

No. de cerdos	Influente					Efluente				
	DQO (mg/l)	DBO ₅ (mg/l)	SST (mg/l)	SSV (mg/l)	CF (NMP/100ml)	DQO (mg/l)	DBO ₅ (mg/l)	SST (mg/l)	SSV (mg/l)	CF (NMP/100ml)
1,000	3,478	996	942	672	1.60E+06	1,049	298.8	538.8	269	1.60E+04
5,000	19,344	9,613	10,125	7,875	4.60E+04	10,094	2,883.9	5,400	3,150	4.60E+02
10,000	40,498	15,061	25,034	19,334	1.60E+09	15,814	4,518.3	13,434	7,734	1.60E+07

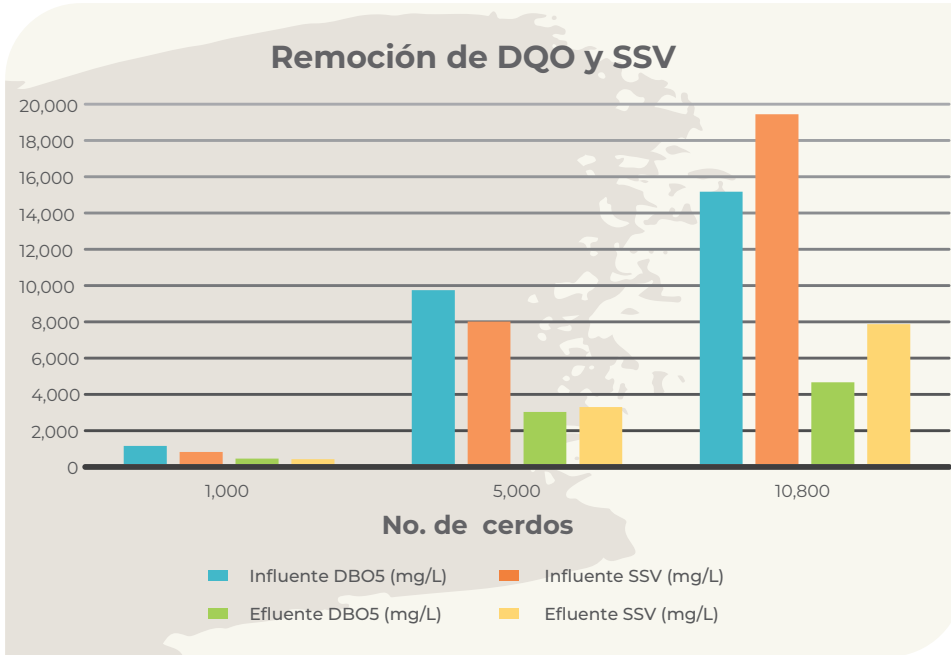


Figura 10.2. Concentraciones de DQO y SSV a la entrada y salida del DLM.

10.1.2.2 Estimación del área requerida para la construcción de digestores tipo laguna cubierta (DLC)

En la sección anterior se estimaron los volúmenes de las lagunas cubiertas. A partir de estos volúmenes se estimarán las áreas y dimensiones para granjas de 1,000, 5,000 y 10,000 cerdos.

Volumen del DLC

El volumen del DLC se calcula utilizando la siguiente relación:

$$V_c = \frac{h}{3}(A + B + \sqrt{A \times B})$$

Donde:

- V_c**: volumen de la cámara (m³)
- h**: profundidad del agua (m)
- A**: área de la base mayor (m²)
- B**: área de la base menor (m²)

Para el diseño del DLC se tomarán en cuenta recomendaciones de que la capacidad de cada laguna cubierta no sea mayor a 1,600 m³ y que la relación largo:ancho sea de 5:1 a 10:1 (Sagarpa y Firco, 2013; Barrena *et al.*, 2009).

En la tabla 10.9 aparece el número de DLC que se requerirá para las diferentes granjas y el volumen de cada laguna cubierta. Este volumen ya considera el 20 %-adicional para el almacenamiento del biogás.

Tabla 10.9. Digestores tipo lagunas cubiertas requeridos para granjas de 1,000, 5,000 y 10,000 cerdos.

Cerdos	V (m ³)	Profundidad del agua (m)	Número de lagunas cubiertas	V de cada laguna cubierta (m ³)
1,000	816	3	1	816
5,000	2,856	3	2	1,428
10,000	3,672	3	3	1,224

En la tabla 10.10 se muestra el área superior e inferior de cada DLC, las dimensiones calculadas, el área superficial de cada digestor y el área superficial total que se requiere para cada granja de acuerdo con el número de cerdos. Esta área superficial total corresponde solamente al volumen de las lagunas cubiertas. Se requiere un área adicional para todas las demás instalaciones que requiere el DLC, como una zanja perimetral para la fijación de la geomembrana y la cubierta para cada laguna. En la figura 10.3 se observan los principales componentes del DLC: cubierta para el almacenamiento de biogás, mezcladores, geomembrana y sistema de recolección de gases.

La figura 10.4 muestra la vista superior del DLC y la distribución de la tubería de recolección de gas (Moncayo, 2020). En el corte transversal se observa la salida de la tubería de gas. En la parte inferior aparecen todos los componentes del sistema de tratamiento si se quiere utilizar el biogás y el biosólido: tanque de mezcla u homogeneización, sistema de limpieza de biogás, generador eléctrico o quemador, tanque de descarga y sistema de tratamiento del biosólido.

Tabla 10.10. Área superficial requerida para los digestores tipo lagunas cubiertas.

Cerdos	# de lagunas cubiertas	V de cada laguna cubierta (m ³)	Área superior (m ²)	L: A (m)	Área inferior (m ²)	L: A (m)	Área superficial por laguna cubierta (m ²)	Área superficial total (m ²)
1,000	1	816	369.8	43 x 8.6	186.05	30.5 x 6.1	370	370
5,000	2	1,428	649.75	56.5 x 11.5	340	40 x 8.5	650	1,300
10,000	3	1,224	556.5	53 x 10.5	281.25	37.5 x 7.5	556.5	1,670



DLC con almacenamiento de biogás

<https://www.engquimicasantosp.com.br/2012/07/biogas.html>



Sistema de mezclado

Laguna revestida de suelo cemento. (s. f.). [Fotografía].



Geomembrana y sistema de recolección de gases

<https://www.georigo.com/img/cabeceras/energia.jpg>

Figura 10.3. Componentes de un biodigestor tipo laguna cubierta (DLC).

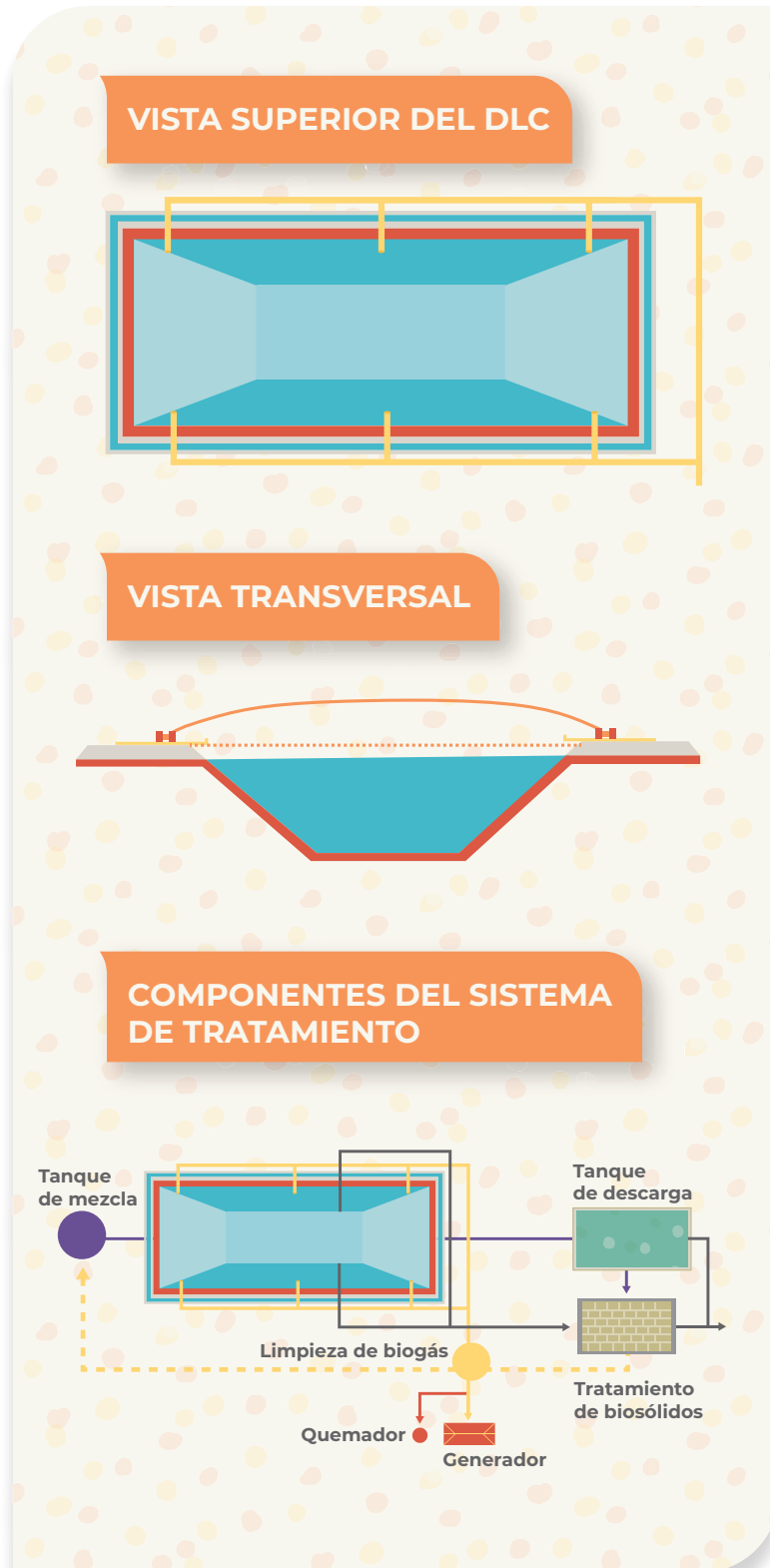


Figura 10.4. Vista superior y transversal del DLC y componentes del sistema de tratamiento.
<https://www.biogas.uno/software-digestores/>

10.1.3 Estimación del volumen y área requerida para digestores completamente mezclados (DCM)

Los digestores cilíndricos son los más utilizados para el tratamiento de este tipo de residuos. Se recomienda que tengan entre 6 y 38 m de diámetro y una profundidad mínima del agua de 6 m (WEF,2012). Estos digestores (DCM) pueden construirse sobre la superficie del terreno y fabricarse en metal o concreto. Generalmente se diseñan para trabajar a temperatura controlada (mesofílica y termofílica), lo que permite disminuir los TRH en el DCM. Cuentan con un sistema de calentamiento y un sistema de agitación, lo que implica mayores costos de operación y mantenimiento.

Para el dimensionamiento de los DCM se consideró que operarán a la temperatura ambiente de la península de Yucatán (25 y 27 °C), sin calentamiento y con un TRH de 30 días para garantizar la destrucción del 60 % de los SSV. El caudal y las características del agua residual son las mismas que se utilizaron para el diseño de los digestores tipo laguna cubierta y que aparecen en las tablas 10.2 y 10.3.

Durante el proceso de tratamiento del DCM para una temperatura de operación entre 25 y 27 °C se estima una remoción de DBO del 80 %, una remoción de DQO de 1.5 mg/l por mg/l de DBO5 removida, una reducción de sólidos volátiles del 60 % y una reducción de coliformes fecales de 2 logaritmos, con cargas orgánicas entre 1.3 y 2.0 g SV/l d. Cargas mayores pueden acidificar el reactor. La producción de metano entre 400 y 300 ml/g MV removidos (Jianbin Guo et al., 2013; Na Duan et al., 2019).

En la tabla 10.11 se muestran las características del efluente o agua residual tratada que sale del DCM. La calidad del efluente requiere de un tratamiento posterior para reutilizarse ya sea dentro o fuera de la granja, al no cumplir con el LMP de coliformes fecales que indica la norma NOM-001-SEMARNAT-1996 para uso en suelos. La tabla 10.12 estima la producción de metano en el DCM. Se consideró una producción de 0.35l/kg MV destruida o removida a temperatura de 28 °C (Jianbin Guo et al., 2013).

Tabla 10.11. Concentraciones del influente y efluente después del tratamiento.

No. de cerdos	Influente					Efluente				
	DQO	DBO ₅	SST	SSV	CF	DQO	DBO ₅	SST	SSV	CF
	mg/l	mg/l	mg/l	(mg/l)	NMP/100ml	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	NMP/100ml
1,000	3,478	996	942	672	1.60E+06	1,049	298.8	538.8	269	1.60E+04
5,000	19,344	9,613	10,125	7,875	4.60E+04	10,094	2,883.9	5,400	3,150	4.60E+02
10,000	40,498	15,061	25,034	19,334	1.60E+09	15,814	4,518.3	13,434	7,734	1.60E+07

Tabla 10.12. Producción de biogás en el DCM.

Cerdos	MV _d (kg/d)	Biogás (m ³ /d)	CH ₄ (m ³ /d)
1,000	8.1	4.52	2.82
5,000	330.8	185.22	115.76
10,000	1,044.0	584.66	365.41

MV_d: más volátil destruida, producción de CH₄: 0.35L/kg MV_d.

En la tabla 10.13 se encuentran los volúmenes de los DCM para los diferentes tamaños de granjas. El volumen total considera un 20 % adicional para el almacenamiento del biogás.

Tabla 10.13. Volumen del DCM para granjas de 1,000, 5,000 y 10,000 cerdos.

Cerdos	l/d por cerdo	Q (/m ³ /d)	TRH (d)	Vr (m ³)	Vt (m ³)
1,000	20	20	30	600	720
5,000	14	70	30	2,100	2,520
10,000	9	90	30	2,700	3,240

Vr, Volumen del DCM; Vt, Volumen total

En la tabla 10.14 aparecen las áreas requeridas para las granjas de 1,000, 5,000 y 10,000 cerdos en función de la profundidad del DCM. Como se observa, el área para la construcción de estos digestores es menor que la requerida para los DLC.

El DCM es de forma cilíndrica y el volumen se calcula con la siguiente ecuación:

$$V = \pi r^2 h$$

Donde:

- V:** volumen del digestor
- r:** radio del digestor
- h:** profundidad o altura

A una temperatura de 28 °C, los DCM funcionan adecuadamente sin calentamiento externo, el TRH es menor y la producción de biogás es mayor que el de los DLC, siempre y cuando el sistema de agitación pueda mantener al digestor completamente mezclado.

Tabla 10.14. Áreas requeridas en digestores completamente mezclados (DCM) a diferentes profundidades.

Cerdos	V (m ³)	Radio (m)	h del agua (m)	Área (m ²)
1,000	720	6.2	6	120.0
5,000	2,520	11.6	6	420.0
10,000	3,240	13.1	6	540.0
1,000	720	5.4	8	90.0
5,000	2,520	10.0	8	315.0
10,000	3,240	11.4	8	405.0
1,000	720	4.8	10	72.0
5,000	2,520	9.0	10	252.0
10,000	3,240	10.2	10	324.0

En la figura 10.5 se muestran los componentes del sistema de tratamiento: tanque de alimentación y mezcla, sistema de captación de biogás, tanque de descarga y lecho de secado del biosólido.

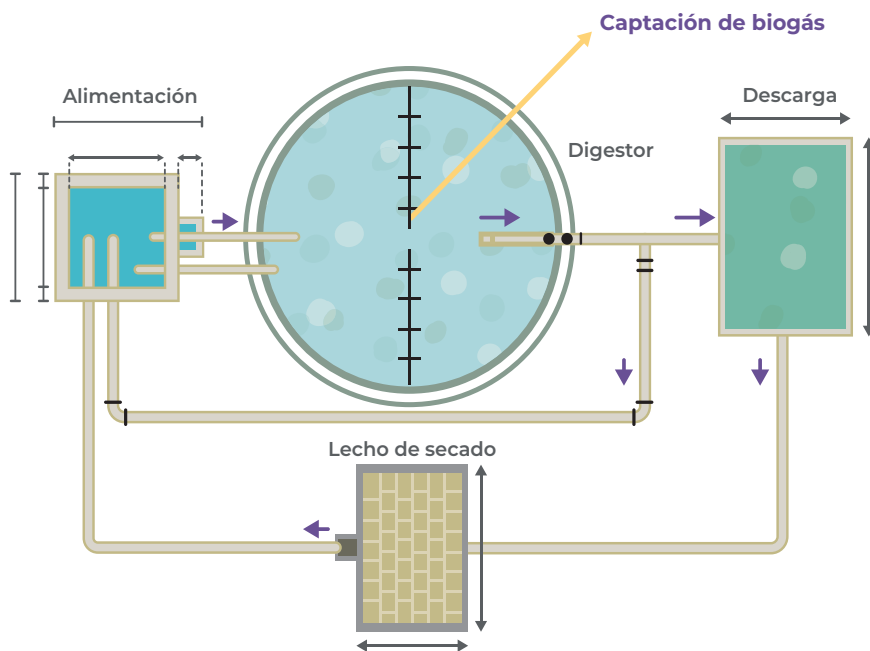


Figura 10.5. Componentes del sistema de tratamiento para un digestor completamente mezclado (DCM).

10.2 Estimación del dimensionamiento de un sistema de tratamiento por lagunas de estabilización

10.2.1 Ejemplos del caso uno

Los sistemas de tratamiento de aguas residuales se deben diseñar con datos climatológicos del sitio donde se van a construir y con datos de caracterización previa de las aguas residuales a tratar, así como de la medición del caudal de diseño y de las características del efluente especificadas (cumplimiento de la norma correspondiente o para reúso). Para el cálculo de los dos siguientes ejemplos de dimensionamiento se obtuvieron datos reportados de la concentración de la demanda bioquímica de oxígeno (DBO₅) y de los coliformes fecales (CF) de las características del agua residual de una granja porcina de 1,000 cerdos (Garzón-Zúñiga y Buelna, 2014). Para los datos de caudal se estimó uno de 0.46 m³ /d (46 l/d caudal máximo por cerdo reportado por Druker et al., (2004) y una población estimada de 10 cerdos) para ser utilizado en el ejemplo uno y de 4 m³ por día para ser utilizado en el ejemplo dos. Como datos climatológicos se tomaron para el ejemplo los de la estación Chochola. Los criterios de diseño aplicados fueron: carga volumétrica (anaerobio), carga superficial (facultativa) y mezcla completa (maduración). Las alturas o profundidades (H) utilizadas fueron: para la laguna anaerobia, 2 m; para la laguna facultativa, 1.5 m, y para las lagunas de maduración, 1 m, las cuales se pueden especificar dependiendo del tipo de suelo del sitio.

La tabla 10.15 presenta los datos utilizados en la estimación del dimensionamiento de los sistemas lagunares. Las tablas 10.16 y 10.17 presentan las dimensiones estimadas para cada tipo de laguna que conforman los sistemas lagunares de los ejemplos uno y dos, así como el tiempo de retención hidráulica (TRH).

Tabla 10.15. Datos utilizados para la estimación del dimensionamiento de los sistemas lagunares.

Datos de entrada para la estimación del diseño	Ejemplo uno	Ejemplo dos
DBO ₅ (mg/l)	996	996
CF (NMP/100ml)	1,600,000	1,600,000
Caudal del influente (m ³ /d)	0.46	4
Temperatura (°C) *	16.9	16.9
Evaporación (mm/día) *	4.2	4.2
Área del sistema lagunar sin considerar bordos ni caminos de acceso (m ²)	9.3	85

*<https://smn.conagua.gob.mx/tools/RESOURCES/Mensuales/yuc/00031090.TXT>.

Tabla 10.16. Resultado del ejemplo uno.

Laguna	Anaerobia 1	Anaerobia 2	Facultativa	Maduración 1	Maduración 2
A (m ²)	1	0.5	5.2	1.3	1.3
H (m)	2	2	1.5	1	1
V (m ³)	2.1	1	8	1.3	1.3
TRH (días)	4.5	2	17.2	3	3

A: área superficial a la altura o profundidad media de la laguna.

Tabla 10.17. Resultado del ejemplo dos.

Laguna	Anaerobia 1	Anaerobia 2	Facultativa	Maduración 1	Maduración 2
A (m ²)	9	5	47	12	12
H (m)	2	2	1.5	1	1
V (m ³)	18	10	70	12	12
TRH (días)	4.5	2.5	18	3	3

A: área superficial a la altura o profundidad media de la laguna.

En la figura 10.6 se muestra un diagrama del ejemplo del sistema lagunar, cabe mencionar que un proceso previo al sistema lagunar es el pretratamiento (rejillas, desarenador y sedimentación) y que el área del pretratamiento no fue estimada en los dos ejercicios.

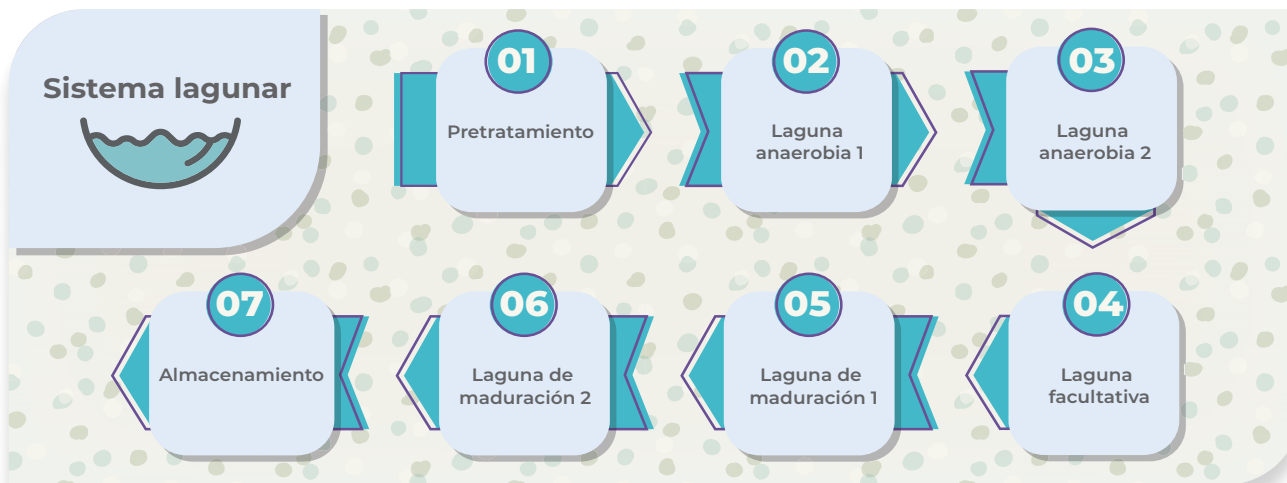


Figura 10.6. Diagrama de flujo del ejemplo de un sistema lagunar.

El diseño de un sistema de tratamiento de aguas residuales deberá comprender un pretratamiento para la remoción de los sólidos, compuesto por operaciones físicas, como son las rejillas y los desarenadores. Dependiendo del contenido de sólidos de las aguas residuales podrá ser necesario adicionar otro método físico de separación de sólidos, por ejemplo, un sedimentador.

Comúnmente, se ha mencionado que las plantas de tratamiento de aguas residuales deben ser un traje a la medida, dado que el diseño de los procesos depende de los datos característicos del agua residual a tratar, del volumen generado, de los datos climatológicos y de las características requeridas en el efluente final. La información del cuestionario a las granjas porcinas recopilará información para obtener un panorama de la situación del tratamiento de las aguas residuales porcinas.



10.2.2 Ejemplos del caso dos

10.2.3.1 Estimaciones de caudales y de las características de las ARP

10.2.3.2 Estimación de las áreas de sistemas lagunares en el tratamiento de aguas residuales porcinas

Se realizó una revisión de páginas de internet referentes a aguas residuales porcinas y se compiló información de caudales de aguas residuales reportados en publicaciones sobre granjas porcinas en Yucatán.

Las tablas 10.18 a 10.20 presentan los caudales reportados por dichas fuentes (www.yumpu.com; Méndez *et al.*, 2009; Druker *et al.*, 2004). La tabla 10.21 presenta el intervalo de las características de aguas residuales de granjas porcinas reportadas en un estudio realizado en Yucatán en el que no se reporta el

tamaño de las granjas (Druker *et al.*, 2004). La tabla 10.22 presenta características de las aguas residuales porcinas de la etapa de engorda en granjas reportadas por Garzón-Zúñiga y Buelna en 2014. Las tablas 10.23 a 10.25 presentan características de las aguas residuales porcinas por tamaño de granja: chica, mediana y grande, respectivamente, y datos estadísticos de elaboración propia realizados a partir de la información reportada por Garzón-Zúñiga y Buelna (2014). La tabla 10.26 presenta los datos iniciales para la estimación de las áreas de ejemplos de sistemas lagunares en el tratamiento de las aguas residuales porcinas.

Cabe mencionar que se revisó un artículo referente a la evaluación de digestores anaerobios en Yucatán (Giacoman *et al.*, 2017), el cual reporta eficiencias de remoción, pero no presenta las características de las aguas residuales. Otro artículo presenta una caracterización de las aguas residuales de una granja sin reportar el tamaño de la misma (Méndez *et al.*, 2013).

Tabla 10.18. Caudal de aguas residuales porcinas.*

Cerdos/ granja	l/d por cerdo						No. Datos
	Promedio	Desviación	Mediana	Máximo	Mínimo	Moda	
100	28.11	4.09	28.11	31	25.22	N/D	2
101-200	22.70	6.22	21.41	31	13.63	31	30
201-300	22.47	4.31	22.17	31	15.09	N/D	12
300-400	22.86	4.06	23.86	27.37	16.05	N/D	6

*Análisis estadístico de elaboración propia a partir de los datos obtenidos de la fuente:

Listado de ubicación de las granjas porcícolas - Yumpu, <https://www.yumpu.com> > document > view > listado-d...Consulta 22/06/21

Tabla 10.19. Caudal de aguas residuales porcinas según fuente.

	UPA	No. de granjas	No. cerdos	Kg de excretas	m ³ /d	m ³ /d por cerdo*	l/d por cerdo*	Cerdos/granja*
Pequeña	1-600	393	105,590	718,606.33	3,157.7	0.030	30	268.68
Mediana	601-2,000	27	40,373	210,194.35	368.05	0.009	9	1,495.30
Grande	2,001-6,000	40	175,976	1,125,441.25	2,408.99	0.014	14	4,399.40
Mega	>6,001	10	272,505	1,391,554.22	2,426.94	0.009	9	27,250.50

Fuente: Méndez *et al.*, (2009)

UPA: Unidad de peso animal por 100 Kg

* Cálculo de elaboración propia a partir de los datos de la fuente.

Tabla 10.20. Caudal de aguas residuales porcinas según fuente.

	UPA	Agua de lavado (l/UPA/d)
Pequeña	< 651	35
Mediana	651-2,000	13
Grande	2,001-6,000	16
Mega	> 6,000	14

Fuente: Druker *et al.*, (2004)

UPA (Unidad de peso animal por 100Kg).

Tabla 10.21. Características de las aguas residuales porcinas según fuente.

Concentración	DBO (mg/l)	SST (mg/l)	NKT (mg/l)
Mínima	6,293	15,106	1,260
Máxima	13,990	33,581	2,801

Fuente: Druker *et al.*, (2004).

Tabla 10.22. Granjas de engorda.

No. de cerdos	DQO (mg/l)	DBO ₅ (mg/l)	SST (mg/l)	NTOT (mg/l)	CF (NMP/100 ml)
1,000	3,478	996	942	524	1.60E+06
1,200	9,300	5,751	2,332	NR	7.90E+05
1,560	16,888	11,697	19,857	1,179	1.50E+08
3,000	38,544	9,188	25,166	1,452	1.10E+08
5,000	19,344	9,613	10,125	1,515	4.60E+04
10,800	40,498	15,061	25,034	1,048	1.60E+09

Fuente: Garzón-Zúñiga y Buelna (2014)
NR: no reportado.

Tabla 10.23. Granjas pequeñas.

No. de cerdos	DBO ₅ (mg/l)	CF (NMP/100 ml)	Tipo de granja
1,000	996	1.60E+06	Engorda
1,200	5,751	7.90E+05	Engorda
1,560	11,697	1.50E+08	Engorda
2,200	5,330	1.30E+08	Mezcla

Análisis estadístico, elaboración propia a partir de datos de la fuente

Media	5,943.50	7.06E+07	Granjas pequeñas
Media geométrica	N/D	1.25E+07	
Desviación	4,396.74	8.06E+07	
Mediana	5,540.50	6.58E+07	
Mínimo	996.00	7.90E+05	
Máximo	1,1697.00	1.50E+08	
Moda	N/D	N/D	

Fuente: Garzón-Zúñiga y Buelna (2014)

N/D = No determinado.

Tabla 10.24. Granjas medianas.

No. de cerdos	DBO ₅ (mg/l)	CF (NMP/100 ml)	Tipo de granja
3,000	9,262	4.60E+08	Maternidad y gestación
3,000	9,188	1.10E+08	Engorda
3,000	2,646	9.30E+07	Mezcla
5,000	9,613	4.60E+04	Engorda
5,500	8,460	9.20E+08	Mezcla
5,600	1,657	1.60E+08	Maternidad
6,000	2,494	1.50E+07	Maternidad
6,600	5,600	2.10E+07	Destete

Análisis estadístico, elaboración propia a partir de datos de la fuente

Media	6,115.00	2.22E+08	Granjas medianas
Media geométrica	N/D	4.22E+07	
Desviación	3,430.26	3.18E+08	
Mediana	7,030.00	1.02E+08	
Mínimo	1,657.00	4.60E+04	
Máximo	9,613.00	9.20E+08	
Moda	N/D	N/D	

Fuente: Garzón-Zúñiga y Buelna (2014)
N/D = No determinado.

Tabla 10.25. Granjas grandes.

No. de cerdos	DBO ₅ (mg/l)	CF (NMP/100 ml)	Tipo de granja
10,800	15,061	1.60E+09	Engorda
15,600	5,092	4.70E+07	Engorda

Análisis estadístico, elaboración propia a partir de datos de la fuente

Media	10,076.50	8.24E+08	Granjas grandes
Media geométrica	N/D	2.74E+08	
Desviación	7,049.15	1.10E+09	
Mediana	10,076.50	8.24E+08	
Mínimo	5,092.00	4.70E+07	
Máximo	15,061.00	1.60E+09	
Moda	N/D	N/D	

Fuente: Garzón-Zúñiga y Buelna (2014)
N/D = No determinado.

Tabla 10.26. Datos iniciales para la estimación del área* de un sistema lagunar.

No. de cerdos	l/d, por cerdo ¹	Fuente ¹	DBO ² (mg/l)	CF ² (NMP/100 ml)	Fuente ²
50	31	www.yumpu.com	590	8.8E+05	Escalante <i>et al.</i> , 2011
100	31	www.yumpu.com	590	8.8E+05	
500	27.37**	www.yumpu.com	996	1.6E+06	
1,000	9	Méndez <i>et al.</i> , (2009)	996	1.6E+06	Garzón-Zúñiga y Buelna (2014)
1,200	9	Méndez <i>et al.</i> , (2009)	5,751	7.9 E+05	
5,000	14	Méndez <i>et al.</i> , (2009)	9,613	4.60E+04	
10,000	9	Méndez <i>et al.</i> , (2009)	15,061	1.60E+09	

* área superficial del espejo de agua a profundidad media

**valor máximo obtenido del análisis estadístico de elaboración propia a partir de datos del intervalo de granjas con una población de 300–400 cerdos.

10.2.3.3 Ejemplos del dimensionamiento de un sistema lagunar

Los sistemas de tratamiento de aguas residuales se deben diseñar con datos climatológicos del sitio donde se van a construir y con datos de caracterización previa de las aguas residuales a tratar, así como de la medición del caudal de diseño y de las características del efluente especificadas (cumplimiento de la norma o para reúso). Para el cálculo de los siguientes ejemplos de dimensionamiento se obtuvieron datos reportados por Escalante *et al.* (2011) y Garzón-Zúñiga y Buelna (2014) para la concentración de la demanda bioquímica de oxígeno (DBO₅) y de los coliformes fecales (CF). Los datos de caudal se estimaron a partir de las publicaciones de www.yumpu.com y Méndez *et al.* (2009). Como datos climatológicos para los ejemplos se tomaron los de la estación Chochola. Los criterios de diseño aplicados fueron carga volumétrica (anaerobio), carga superficial (facultativa) y mezcla completa (maduración). Las alturas o profundidades (H) utilizadas fueron las siguientes: laguna anaerobia (2 m), laguna facultativa (1.5 m) y lagunas de maduración (1 m), las cuales se pueden especificar dependiendo del tipo de suelo del sitio.

La tabla 10.27 presenta los datos utilizados en la estimación del dimensionamiento de los sistemas lagunares. Las tablas 10.28 a 10.31 presentan las dimensiones estimadas para cada tipo de laguna que conforman los sistemas lagunares de los ejemplos uno a cuatro, así como el tiempo de retención hidráulica (TRH).

Tabla 10.27. Datos para la estimación del área** de los sistemas lagunares.

Datos de entrada para los ejemplos	Uno (50 cerdos)	Dos (100 cerdos)	Tres (500 cerdos)	Cuatro (1,000 cerdos)	Cinco (1,200 cerdos)	Seis (5,000 cerdos)	Siete (10,000 cerdos)
DBO ₅ (mg/l)	590	590	996	996	5,751	9,613	15,061
CF (NMP/100 ml)	8.8E+05	8.8E+05	1.6E+06	1.6E+06	7.9E+05	4.6E+04	1.6E+09
Caudal del influente (m ³ /d)	1.55	3.1	13.7	9	9	70	90
Temperatura (°C) *	16.9	16.9	16.9	16.9	16.9	16.9	16.9
Evaporación (mm/día) *	4.2	4.2	4.2	4.2	4.2	4.2	4.2

*<https://smn.conagua.gob.mx/tools/RESOURCES/Mensuales/yuc/00031090.TXT>
** área superficial del espejo del agua a la profundidad media de las lagunas.

Tabla 10.28. Resultado del ejemplo uno, caudal estimado para una población de 50 cerdos.

Laguna	Anaerobia 1	Anaerobia 2	Facultativa	Maduración 1	Área Total*
A (m ²)	2	0.9	10.5	10.7	24
H (m)	2	2	1.5	1	
V (m ³)	4	1.8	15.08	10.7	*sin considerar bordos ni caminos de acceso
TRH (días)	2.5	1.15	9.86	6.98	

A: área superficial del espejo del agua a la altura o profundidad media de la laguna.

Tabla 10.29. Resultado del ejemplo dos, caudal estimado para una población de 100 cerdos.

Laguna	Anaerobia 1	Anaerobia 2	Facultativa	Maduración	Área Total*
A (m ²)	3.9	1.8	20.1	22	47.8
H (m)	2	2	1.5	1	
V (m ³)	7.8	3.6	30.5	22	*sin considerar bordos ni caminos de acceso
TRH (días)	2.5	1.15	9.9	7.1	

A: área superficial del espejo del agua a la altura o profundidad media de la laguna.

Tabla 10.30. Resultado del ejemplo tres, caudal estimado para una población de 500 cerdos.

Laguna	Anaerobia 1	Anaerobia 2	Facultativa	Maduración 1	Área Total*
A (m ²)	29	13.2	150	61	253
H (m)	2	2	1.5	1.00	
V (m ³)	57	26.3	225	61	*sin considerar bordos ni caminos de acceso
TRH (días)	4.2	1.93	17	4.7	

A: área superficial del espejo del agua a la altura o profundidad media de la laguna

Tabla 10.31. Resultado del ejemplo cuatro, caudal estimado para una población de 1,000 cerdos.

Laguna	Anaerobia 1	Anaerobia 2	Facultativa	Maduración 1	Área Total*
A (m ²)	19	8.66	98.55	40.15	166
H (m)	2	2	1.5	1.00	
V (m ³)	38	17.32	147.83	40.15	*sin considerar bordos ni caminos de acceso
TRH (días)	4.2	1.93	16.96	4.72	

A: área superficial del espejo del agua a la altura o profundidad media de la laguna.

En la figura 10.7 se muestra un diagrama del ejemplo del sistema lagunar. Cabe mencionar que un proceso previo al sistema lagunar es el pretratamiento (rejillas, desarenador y sedimentación) y que el área del pretratamiento no fue estimada en los ejercicios.

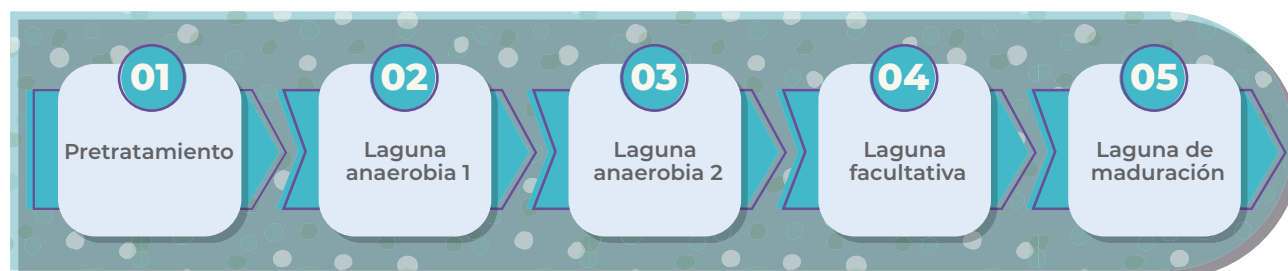


Figura 10.7. Diagrama de flujo del ejemplo de un sistema lagunar.

El diseño de un sistema de tratamiento de aguas residuales deberá incluir un pretratamiento para la remoción de los sólidos, comprendido por operaciones físicas, como son las rejillas y los desarenadores. Dependiendo del contenido de sólidos de las aguas residuales podrá ser necesario adicionar otro método físico de separación de sólidos, por ejemplo, un sedimentador.

Comúnmente se ha mencionado que las plantas de tratamiento de aguas residuales deben ser un traje a la medida, dado que el diseño de los procesos depende de los datos característicos del agua residual a tratar, del caudal generado en el sitio, de los datos climatológicos y de las características requeridas en el efluente final del tratamiento.

La información del cuestionario aplicado a las granjas porcinas recopilará información para obtener un panorama de la situación del tratamiento de sus aguas residuales.

Cabe mencionar que se realizó la estimación del dimensionamiento de los sistemas lagunares para granjas de 1,000, 5,000 y 10,000 cerdos, y que al utilizar la referencia de Méndez *et al.* (2009), el caudal estimado de aguas residuales a tratar sería de 9, 70 y 90 m³/d, respectivamente, y la concentración de DBO reportada por Garzón-Zúñiga y Buelna en 2014, de 5,751 (dato reportado para granjas de 1,200 cerdos), 9,613 y 15,061 mg/l, respectivamente. El resultado del dimensionamiento indica que los criterios de diseño no se cumplen para el TRH de la laguna anaerobia; por lo tanto, se requiere del diseño de un digestor o biodigestor anaerobio previo al sistema lagunar para estas poblaciones de granjas porcinas con esas características de caudal y de concentración de DBO.

10.3 Estimación de áreas para sistemas lagunares como postratamiento de digestores anaerobios en el tratamiento de aguas residuales porcinas

Como se ha mencionado, los sistemas de tratamiento de aguas residuales se deben diseñar con datos climatológicos del sitio donde se van a construir y con datos de caracterización previa de las aguas residuales a tratar, así como de la medición del caudal de diseño y de las características del efluente especificadas (cumplimiento de la norma, o para reúso).

10.3.1 Ejemplos del dimensionamiento de un sistema lagunar como postratamiento

Las características de los efluentes del tratamiento de aguas residuales porcinas mediante los procesos de digestión anaerobia de laguna cubierta (DLC) y de reactor anaerobio completamente mezclado (DCM) se mostraron en las tablas 10.8 y 10.11, respectivamente. El dimensionamiento de los mismos se describió en el apartado 10.1, así como las características de los efluentes de los digestores anaerobios.

Las características para la estimación del dimensionamiento del postratamiento de los efluentes de los digestores anaerobios en el tratamiento de las aguas residuales porcinas se muestran en la tabla 10.31.

Los criterios de diseño aplicados fueron: carga volumétrica (anaerobio), carga superficial (facultativa) y mezcla completa (maduración). Las alturas o profundidades (H) utilizadas fueron las siguientes: laguna anaerobia (2 m), laguna facultativa (1.5 m) y lagunas de maduración (1 m), las cuales se pueden especificar dependiendo del tipo de suelo del sitio. Las características planteadas del efluente del sistema lagunar con respecto a $DBO_5 \leq 30$ mg/l y para $CF \leq 1000$ NMP/1000ml.

Tabla 10.31. Datos para la estimación del área** de los sistemas lagunares.

Datos de entrada para los ejemplos	Uno (1000 cerdos)	Dos (1000 cerdos)	Tres (5000 cerdos)	Cuatro (5,000 cerdos)	Cinco (10,000 cerdos)	Seis (10,000 cerdos)
DBO_5 (mg/l)	299	199.2	2,883.9	1,992.6	4,518.3	3,012.2
CF (NMP/100 ml)	1.6E+04	1.6E+04	4.6E+02	4.6E+02	1.6 E+07	1.6E+07
Caudal del influente (m^3/d)	20	20	70	70	90	90
Temperatura ($^{\circ}C$) *	16.9	16.9	16.9	16.9	16.9	16.9
Evaporación (mm/día) *	4.2	4.2	4.2	4.2	4.2	4.2

*<https://smn.conagua.gob.mx/tools/RECURSOS/Mensuales/yuc/00031090.TXT>

** área superficial del espejo del agua a la profundidad media de las lagunas.

En la tabla 10.32 se presentan las estimaciones de las áreas para tres opciones de postratamiento para los datos del caso número uno de este apartado.

Las figuras 10.8 a 10.10 presentan esquemas de las tres opciones de postratamiento del caso número uno de este apartado.

En la tabla 10.33 se presentan las estimaciones de las áreas para dos opciones de postratamiento para los datos del caso número dos de este apartado.

Las figuras 10.11 y 10.12 presentan esquemas de las dos opciones de postratamiento del caso número dos de este apartado.

Tabla 10.32. Opciones del postratamiento (por lagunas de estabilización) del efluente del digester tipo laguna cubierta (DLC) para granjas de 1,000 cerdos, caso uno de este apartado.

Laguna	Opción 1		Opción 2		Opción 3		
	Anaerobia	Facultativa	Facultativa 1	Facultativa 2	Facultativa 1	Maduración 1	Maduración 2
A (m ²) *	13	142	308	87	308	94	94
H (m)	2	1.5	1.5	1.5	1.5	1.00	1.00
V (m ³)	26	213	462	130.5	462	94	94
TRH (días)	1.3	11	24	7	24	5	5
Área (m ²) *	A + F =	155	F1 + F2 =	395	F + M1 + M2 =		496

A: área superficial del espejo de agua a la altura o profundidad media de la laguna
*sin considerar bordos ni caminos de acceso

Tabla 10.33. Opciones del postratamiento (por lagunas de estabilización) del efluente del digester anaerobio completamente mezclado (DCM) para granjas de 1,000 cerdos, caso dos de este apartado.

Laguna	Opción 1		Opción 2	
	Anaerobia	Facultativa	Facultativa 1	Facultativa 2
A (m ²) *	10	95	206	131
H (m)	2	1.5	1.5	1.0
V (m ³)	20	142	308	131
TRH (días)	1	7.2	16	6.7
Área (m ²) *	A + F =	105	F1 + M1 =	337

A: área superficial del espejo de agua a la altura o profundidad media de la laguna
*sin considerar bordos ni caminos de acceso

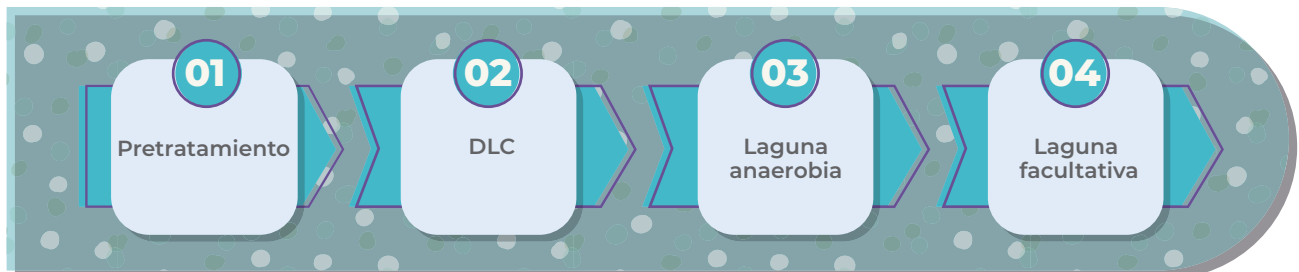


Figura 10.8. Tren de tratamiento de la opción uno, caso 1 de este apartado, incluyendo los tratamientos previos.

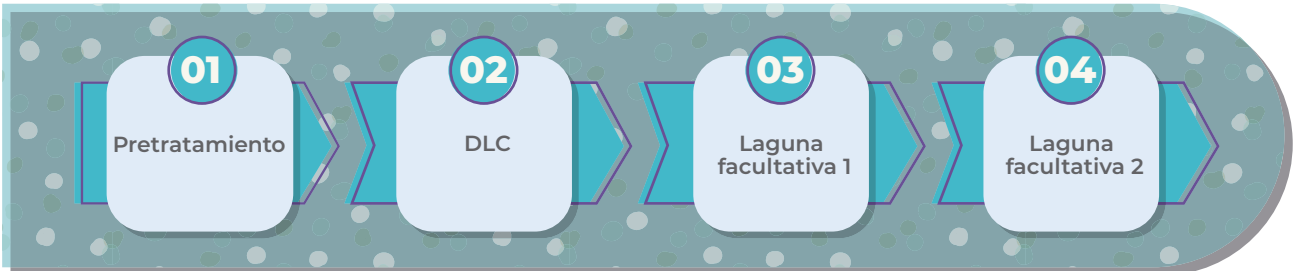


Figura 10.9. Tren de tratamiento de la opción dos, caso 1 de este apartado; incluyendo los tratamientos previos.

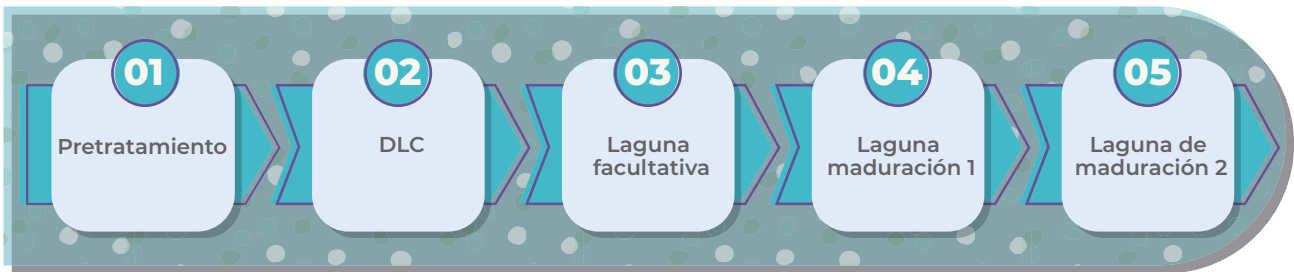


Figura 10.10. Tren de tratamiento de la opción tres, caso 1 de este apartado; incluyendo los tratamientos previos.

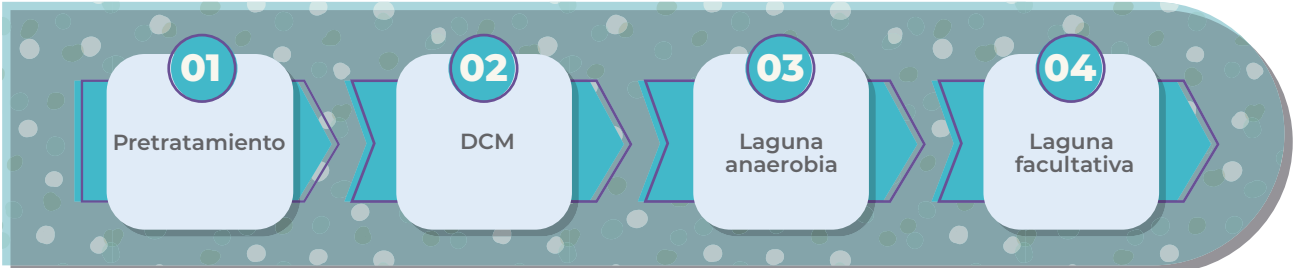


Figura 10.11. Tren de tratamiento de la opción uno, caso 2 de este apartado; incluyendo los tratamientos previos.

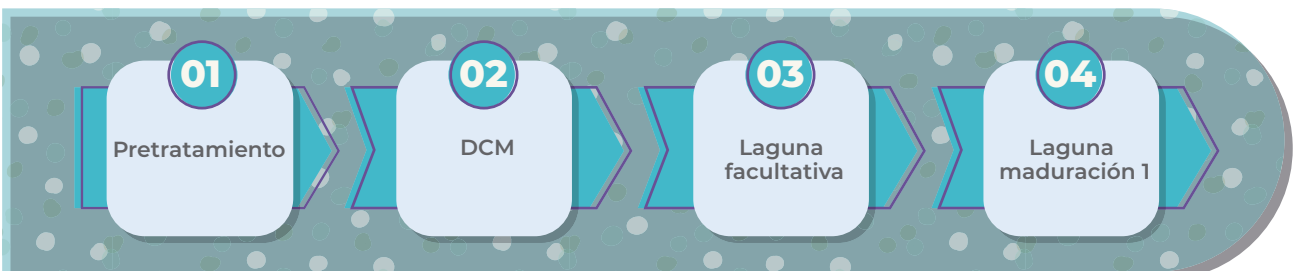


Figura 10.12. Tren de tratamiento de la opción dos, caso 2 de este apartado; incluyendo los tratamientos previos.

Para los casos tres a seis de este apartado (tabla 10.31) se realizó la estimación del dimensionamiento de los sistemas lagunares para granjas con población de 5,000 cerdos (Q estimado= $70 \text{ m}^3/\text{d}$) y 10,000 cerdos (Q estimado= $90 \text{ m}^3/\text{d}$) y las características del efluente tanto de los DLC (2,883.9 y 4,518.3 mg DBO_5/l) como de los DCM (1,922.6 y 3,012.2 mg DBO_5/l). El resultado del dimensionamiento indica que los criterios de diseño no se cumplen para el TRH de las lagunas anaerobia, facultativa y de maduración, por lo tanto, se requiere del diseño de otro proceso anaerobio en serie al DLC y DCM antes del postratamiento con un sistema lagunar para estas poblaciones de granjas porcinas con esas características de caudal y de concentración de DBO.



COMPOSTEO

de los residuos sólidos



11

11 COMPOSTEO DE LOS RESIDUOS SÓLIDOS

11.1 Modelo 1.-Granja de traspatio para el manejo de residuos sólidos (10 cerdos en crecimiento-engorda, 70 kg de peso promedio)

Los cerdos se encuentran en una galera sobre una cama de paja, misma en la que excretan. Parte de esta cama, junto con las excretas, se retiran diariamente. La producción de estiércol o excretas por animal en engorda es de 4.38 kg/día, incluye 2.41 kg de heces fecales y 1.97 kg de orina/día. Por 10 cerdos en engorda, se tendrán 43.8 kg de excretas/día, con la paja se agregarán otros 20 kg, más 30 kg de residuos diversos de la vivienda, por lo que se tendrán finalmente cerca de 100 kg de material al día para el composteo. Siguiendo la metodología propuesta por la FAO (2013) podemos aplicar este ejemplo para calcular la cantidad de material en composteo y las dimensiones de la pila.

Para la instalación de la cama de paja se requiere mantener una capa gruesa de 10–15 cm, para que se retengan las excretas y la mayor parte de la orina. La cama se retira a diario y solo se deja la paja que no esté impregnada de orina o excretas. Cuando ya se tenga la composta estabilizada, puede combinarse con paja fresca y ser usada en las camas.

Un agricultor porcícola familiar tiene un total de 100 kg al día de excretas porcinas y de otros animales, paja y restos vegetales del huerto y de la cocina. Si se considera una densidad de 250 kg/m³, entonces el volumen de la pila será:

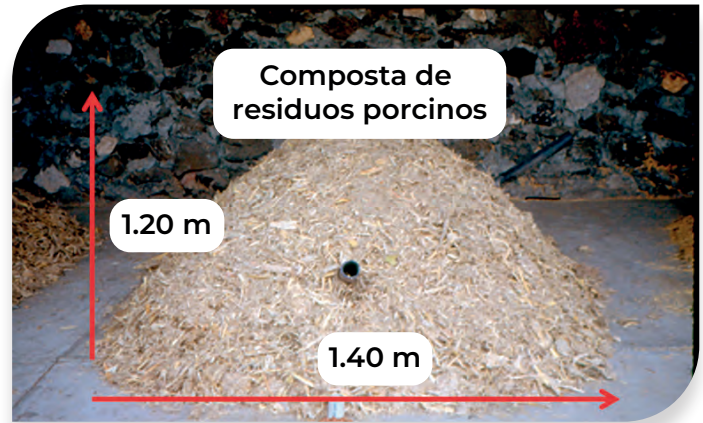
$$\text{Volumen de la pila} = \frac{100 \frac{\text{kg}}{\text{d}}}{250 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}} = 0.4 \text{ m}^3/\text{d}$$

Este volumen no es suficiente para hacer una pila diaria (volumen mínimo de 1 m³). Pero si tomamos en cuenta la producción semanal de residuos de este

$$\text{Volumen de la pila} = \frac{700 \frac{\text{kg}}{\text{semana}}}{250 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}} = 2.8 \text{ m}^3/\text{semana}$$

agricultor (700 kg/semana), sí podríamos hacer una pila pequeña a la semana. En este caso se utiliza la fórmula del volumen de un paralelepípedo como medida aproximada de volumen de una pila (figura 11.1).

$$\text{Volumen de la pila} = 1,2 \times 1,4 \times 1,68 = 2,8 \text{ m}^3$$



(1.2 m de altura , 1.4 m de ancho, 1.68 m de largo)

Figura 11.1. Pila de composteo en paralelepípedo.

Si se une a otro vecino que tenga residuos similares, se pueden conseguir 5.6 m³, e instalar una pila de 5.6 m³.

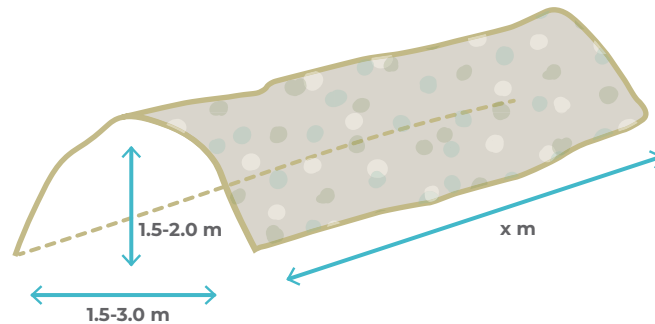


Figura 11.2. Pila alargada o camellón.

Las dimensiones de la pila serían las siguientes:
Suponiendo una altura (y) de 1.5 m y un ancho (z) de 1.5 m, entonces la longitud (x) de la pila será:

$$(1.5 \text{ m de altura} \times 1.5 \text{ m de ancho}) = 2.25 \text{ m}^2, \text{área frontal de la pila .}$$

Medida aproximada del largo de la pila (x)

$$X = 5.6 \text{ m}^3 / 2.25 \text{ m}^2 = 2.49 \text{ m de largo. Se considerará 2.5 metros de largo}$$

$$\text{Volumen de la pila} = 1.5 \times 1.5 \times 2.5 = 5.6 \text{ m}^3$$

Recomendaciones para la operación de la pila

1.-Retiro de excretas. Se retiran de la galera de los cerdos, se colocarán diariamente en el área de composteo y se irán acomodando para conformar la pila, y se cubrirán con una capa de paja o un plástico para evitar la presencia de vectores (moscas, etc.)

2.-Ubicación del sitio de composteo. Si no hay suficiente área en el traspatio, se puede instalar cerca del huerto o parcela.

3.-Dimensiones de la pila y área de composteo. Durante el proceso de compostaje, la pila disminuye de tamaño (hasta un 50 % en volumen) por compactación, pérdida de carbono (CO₂) y humedad. Las pilas se hacen de entre 1.5 y 2 m de alto, para facilitar tareas de volteo, y de entre 1.5 y 3 m de ancho.

Área de terreno a considerar para la instalación de las pilas tomando en cuenta el largo y ancho de las mismas:

Pilas	Dimensiones Ancho x largo	Área/pila	Área /4 pilas/mes
	m		m ²
2.8 m ³	1.40 x 1.68	2.4	10
5.0 m ³	1.5 x 2.25	3.4	14

4.-Inocuidad de la composta (etapa termofílica). Para garantizar la inocuidad se deben obtener registros diarios de temperatura durante la etapa termofílica de >55 °C durante 15 días seguidos para alcanzar una categoría de biosólido tipo B, uso restringido, o >60 °C durante tres días consecutivos, para una reducción significativa de patógenos, biosólido tipo A, de uso irrestricto. **La duración de esta etapa puede ser de 2 a 6 semanas.** Si no se cuenta con un termómetro, una manera sencilla de medir la temperatura será introduciendo un machete en el centro de la pila durante 5 minutos, si la temperatura es >60 °C, el calor del machete no podrá soportarse al tacto.

5.-Etapa mesofílica o estabilización adicional. Después de la etapa termofílica, la temperatura disminuye y se vuelve mesofílica, indicando el comienzo de la etapa de curado, que es una estabilización adicional. En esta etapa se pueden inocular las lombrices, a razón de 1 kg/m², para acelerar el proceso, que sin lombrices puede **durar de 3 a 6 meses.** A un lado de la pila en etapa de curado se instalará la siguiente pila con material fresco, que entrará en composteo, y así hasta completar cuatro pilas por mes.

6.-Recomendaciones generales

- Las compostas se deberán colocar sobre la superficie del suelo.
- Las pilas se deben voltear cada semana para airear y mezclar materiales.
- Las pilas deben tener cerca de 60 % de humedad, pero no deben escurrir agua.

- Si al tercer día la temperatura no sube, se debe agregar material verde, como recortes de pasto, hojas verdes, estiércol fresco, un poco de humedad, y volver a mezclar.

Herramientas recomendadas

1.-Pala: para agregar material, voltear y sacar la composta terminada.

2.-Tijeras de podar o trituradora: para conseguir un tamaño de partícula adecuado (paja), de 5 a 20 cm.

3.-Regadera, manguera o aspersor: para mantener una correcta humedad del material en compostaje.

4.-Termómetro metálico con pivote de 20 o 50 cm: para la medición de la temperatura del material en compostaje. Si no se tiene un termómetro, se puede usar una vara metálica o un palo de madera, el cual se entierra en la pila al iniciar, se saca cada vez que se verifica la temperatura, la cual debe sentirse caliente al tacto.

5.-Tamiz: Para el cernido del material al finalizar el proceso de compostaje y para separar elementos gruesos que aún no se han descompuesto, los cuales se pueden reciclar.

6.-Papel de pH (opcional): para el control de la acidez durante el proceso.

7.-Otros. Utensilios varios que ayuden en la labor, como los rastrillos, carretillas, etc.



Figura 11.3. Herramientas para el composteo.

Otras formas de composteo

Otro tipo de composteo muy usado es el de capas, en el que se van colocando los residuos en capas. La altura de la composta dependerá del alcance manual del operador. Las capas de residuos van superpuestas, sin ninguna protección ni colocando ninguna barrera perimetral, como se ve en las figuras siguientes. La primera capa se forma con ramas gruesas, para que pueda drenar el exceso de humedad; posteriormente se van colocando capas de residuos con paja: heces fecales, residuos de poda, residuos de cocina. Cada capa estará dividida por una capa de paja.



Figura 11.4. Otras formas de composteo.

II.2 Modelo 2.-Bloques continuos de vermicomposteo para el manejo de excretas porcinas en traspatio (10 cerdos en crecimiento-engorda, 70 kg de peso en promedio)

Los cerdos se encuentran en una galera o piso, donde excretan. Las excretas sólidas se retiran diariamente con pala. La producción de estiércol por animal en engorda es de 2.41 kg de heces fecales, por 10 cerdos en engorda, se tendrán 24.1 kg de heces/día. Se pueden agregar residuos sólidos orgánicos de la vivienda o de otros animales, por lo que se tendrán finalmente cerca de 30 a 50 kg de material al día para el vermicomposteo.

Construcción de los módulos

El material para las paredes puede ser metálico o bloque de cemento. El piso puede ser de tierra o de cemento. Si es de cemento, se debe considerar una pendiente del 3 % que conecte a un canal de drenaje, donde se puede colectar

el exceso de humedad. Cada bloque mide 1 m de ancho x 1 m de largo x 1 m de altura. El módulo está dividido en cuatro bloques, considerando uno por cada semana. Las dimensiones del módulo pueden ser: 4 m de largo x 1 m de ancho x 1 m de altura. Cada módulo está dividido por mamparas fijas. Cada mampara debe tener un marco con una estructura metálica fuerte, y en el centro debe colocarse una malla metálica con un diámetro de abertura de 1 cm, mínimo, para permitir el paso de las lombrices. Los módulos se tapan con un techo de lámina con marco metálico.



Figura 11.5. Sistema de bloques continuos para procesar excretas porcinas.

Puesta en marcha del sistema

1.-Base de soporte. Colocar en los módulos una capa de 10 cm de suelo natural. Posteriormente puede ser composta o vermicomposta ya estabilizada. Esta capa servirá de refugio a las lombrices, pero también servirá para inocular microorganismos que se encuentren en el suelo o compostas.

2.-Prueba 50 lombrices (P50L). Para estar seguros de que las lombrices van a aceptar las heces fecales frescas, se hace una prueba de 50 lombrices (P50L), la cual consiste en poner en un recipiente pequeño 50 lombrices adultas con las heces fecales frescas. Las lombrices tienen que permanecer ahí 24 horas, después de las cuales se deben encontrar por lo menos 48 lombrices en buen estado. Si la mayoría se murieron, escaparon o su cuerpo está maltratado, quiere decir que las heces fecales deben pasar por un proceso de precomposteo (ver el modelo 1).

3.-Siembra de lombrices. En el primer módulo se sembrarán sobre la capa de suelo 2.5 kg de lombriz roja californiana (*Eisenia, sp.*). Se debe revisar bien que la lombriz esté limpia, libre de plagas, como planarias.

4.-Alimentación por capas diarias (primer módulo). Colocar residuo fresco o pre-compostado que servirá de alimento a las lombrices. Esta acción se repetirá diariamente durante la semana, por capas, en el mismo módulo. Las lombrices se alimentarán de abajo hacia arriba, a razón de 2–4 cm por día. No se requiere de riego, porque las heces fecales tienen suficiente humedad. Pero si fuera necesario, se puede hacer un riego ligero.

5.-Traspaso de lombrices y alimentación al segundo módulo. Una vez que se llenó el primer módulo, las lombrices se encontrarán en los primeros 10 cm de la última capa. Se remueven manualmente y se colocan en la base del segundo módulo. Se coloca sobre las lombrices una capa de heces o residuo precompostado, y así empieza un nuevo ciclo en el segundo módulo. Las lombrices restantes que se encuentren en el primer módulo se desplazarán a través de los orificios de la malla metálica, buscando nuevo alimento.

6.-Fin del primer ciclo en el sistema. Cada semana se iniciará con el siguiente módulo. Cuando se llene el cuarto módulo, se vacía de vermicomposta el primer módulo y se coloca otra vez una capa de suelo o composta de 10 cm, como base. Se remueven las lombrices del cuarto módulo (última capa de 10 cm) y se llevan al primero. En el cuarto módulo se puede recuperar el resto de las lombrices colocando una capa de alimento fresco encima del módulo. La vermicomposta del segundo, tercer y cuarto módulo se retira conforme avance la secuencia en cada módulo.

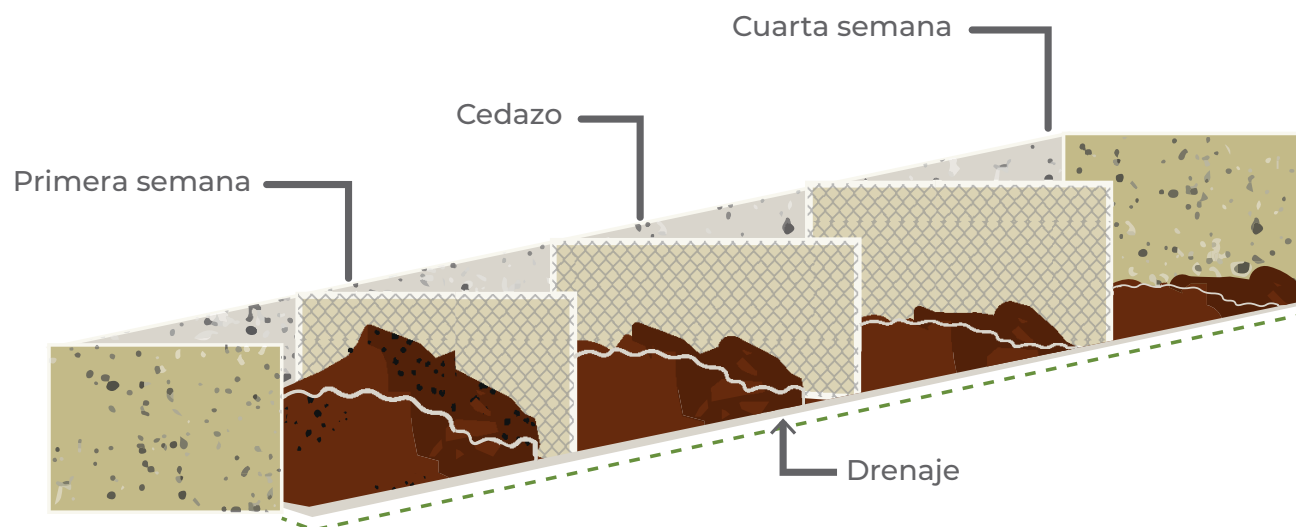


Figura 11.6. Sistema de bloques para el tratamiento de residuos porcinos.

Productos finales

La vermicomposta y las lombrices tienen un valor comercial, por lo que representarían beneficios adicionales para el productor de traspatio y su familia. Por otra parte, este tipo de tecnologías representa una alternativa para el tratamiento sustentable de los residuos porcinos que ayuda a la disminución de la contaminación difusa.



Figura 11.7. Abono empacado en bolsas de 2 kg y lombrices (Campos Solano et al., 2014).



ANEXO

1



ANEXO 1

CUESTIONARIO SOBRE EL TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES PORCINAS

1	Población/localidad:	▶
2	Nombre de la granja:	▶
3	Nombre del propietario/a o propietarios/as	
4	Nombre de la persona que contesta la encuesta	▶
5	Coordenadas de ubicación de la granja	▶
6	Tipo de clima del lugar	▶
7	¿Cómo se considera el grado de tecnificación de la granja?	Tecnificada () Semitecnificada () De traspatio ()
8	Número de cerdos/proceso productivo/año	Etapa de maternidad Etapa de engorda Etapa de destete Ciclo combinado
9	Tamaño de la granja	Chica () Mediana () Grande ()
10	Volumen del agua utilizada	▶
	Línea (entubada) (m ³ /día)	
	Pozo (m ³ /día)	
11	Aguas residuales porcinas (ARP) generadas (m ³ /día)	▶
12	Residuos sólidos generados (m ³ /día)	▶
13	¿Cuenta con permiso de descarga?	Sí () No ()
14	¿Cuenta con planta de tratamiento de ARP?	Sí () No () Si la respuesta es negativa, pasar a la pregunta número 19.

Tren de tratamiento de ARP				
	Separación de sólidos	Tipo		
		Área ocupada (m ²)		
	Fosa o tanque séptico	Volumen (m ³)		
		Área ocupada (m ²)		
15	Biodigestor	Tipo		
		Volumen del biodigestor (m ³)		
		Área ocupada (m ²)		
		Volumen de biogás generado (m ³ /día)		
		¿Es utilizado el biogás?		
	Laguna anaerobia	Existe quemador de biogás		
		Volumen (m ³)		
		Área ocupada (m ²)		
		Humedal	Superficial (m ²)	Tipo de planta:
			Subsuperficial (m ²)	Tipo de planta:
Plantas flotantes (m ²)	Tipo de planta:			
	Lagunas de estabilización	Primaria, Volumen (m ³)	Área ocupada (m ²)	
		Secundaria Volumen (m ³)	Área ocupada (m ²)	
		Terciaria Volumen (m ³)	Área ocupada (m ²)	
	Otros procesos de tratamiento	Volumen (m ³)	Área ocupada (m ²)	
	Composteo	Área ocupada (m ²)	Volumen tratado (m ³ /día)	
	Vermicomposteo	Área ocupada (m ²)	Volumen tratado (m ³ /día)	
16	Volumen del ARP tratada	Volumen (m ³ / día)		
17	Destino o manejo del ARP tratada	▶		

18	Volumen del ARP tratada reusada	Volumen (m ³ / día)
19	Destino o manejo de los biosólidos	▶
20	¿Cuenta con área disponible para el tratamiento de ARP y sólidos?	Sí () Área disponible (m ²) No ()
21	¿Cuenta con área disponible para incrementar procesos de tratamiento?	Sí () Área disponible (m ²) No ()
22	¿Se tienen resultados de una caracterización del ARP y de ARP tratada?	Sí () * No () *Si la respuesta es afirmativa, aplicar el cuestionario de caracterización.
23	¿Se permite la toma de fotografías?	Sí () * No () *Si la respuesta es afirmativa, hacer un anexo fotográfico

ANEXO 2



ANEXO 2

Los aspectos técnicos de un muestreo confiable son: determinación del sitio que represente al total de la descarga, toma de muestras precisas y bien ejecutadas, uso de equipos y materiales adecuados para la toma de muestras, preservación de las mismas y transporte seguro.

Las características del muestreo confiable se deberán verificar de acuerdo con las siguientes normas:

Norma Oficial Mexicana NOM-001-SEMARNAT-1996. Publicada en el Diario Oficial de la Federación el 24 de diciembre de 1996. Establece los límites máximos permisibles de contaminante en las descargas de aguas residuales en aguas y bienes nacionales.

Norma Mexicana NMX-AA-003-SCFI-1980. Aguas residuales – Muestreo. Publicada en el Diario Oficial de la Federación el 25 de marzo de 1980.

Norma Oficial Mexicana NOM-004-SEMARNAT-2002. Protección ambiental. Lodos y biosólidos. Especificaciones y límites máximos permisibles de contaminante para su aprovechamiento y disposición final.

El primer paso para garantizar resultados de buena calidad es realizar un muestreo confiable. Una componente esencial para asegurar la representatividad de las muestras es la determinación específica del sitio en el que se tomará el total de ellas, con el equipo adecuado y tomando las precauciones necesarias para no contaminarlas y preservarlas de acuerdo con los procedimientos establecidos. Además, las muestras deben identificarse claramente y transportarse con seguridad para garantizar su rastreabilidad, integridad física y entrega al laboratorio.

La siguiente etapa es la determinación de contaminantes en la descarga. Para ello se requiere de un laboratorio acreditado ante la Entidad Mexicana de Acreditación (EMA) y aprobado por la Comisión Nacional del Agua (Conagua), entidades que aplicarán los procedimientos normalizados y llevarán un estricto control de calidad de las pruebas.

El objetivo es lograr una muestra que represente e indique el estado promedio de la PTAR de acuerdo a cuatro principios:

1. Lugar: elegir un lugar adecuado para tomar la muestra.
2. Tiempo: considerar el tiempo adecuado para tomar la muestra.
3. Frecuencia: tomar las muestras en la frecuencia adecuada.
4. Técnica: usar una técnica de muestreo adecuada.

El lugar donde se toman las muestras influye determinadamente en la precisión de los resultados con los que se establecerá el buen o mal funcionamiento de la PTAR. Para evitar un error de diagnóstico se aconseja tomar en cuenta los siguientes aspectos:

a. Elija un lugar donde el agua esté bien mezclada. Ya sea porque corra más rápido exista una caída. Así, estas condiciones aseguran una buena mezcla que repre-

sente el agua de la PTAR. Cabe resaltar que, si se quiere conocer la eficiencia de una laguna o de un tanque, es mejor tomar la muestra en el canal o en la tubería de conexión al siguiente dispositivo y no directamente del tanque o de la laguna.

b. No tocar el fondo o las paredes con el muestreador. Asegúrese que es un lugar donde el recipiente de la muestra tenga suficiente espacio para obtener el agua.

Higiene y seguridad. Se deben utilizar cubre bocas, mascarilla o lentes de protección y guantes de látex (nuevos de preferencia, si se reutilizan que sean exclusivos para cada punto de muestreo). Para el manejo de muestras peligrosas se deben utilizar guantes de hule.

Tipo de recipientes. Para obtener una muestra compuesta se necesitará un recipiente adecuado a su volumen y tipo de análisis: en el caso de compuestos orgánicos traza se utilizarán recipientes de materiales compatibles ya sean acero inoxidable, vidrio borosilicato o teflón, y de plástico para estudiar metales. Las muestras se deben agitar perfectamente, distribuir adecuadamente y documentar la cantidad de cada submuestra.

Muchas veces se subestima la influencia del tiempo correcto, según el clima o la hora del día para la obtención de muestras. Por ejemplo, no se obtienen muestras en días lluviosos, ya que la dilución influye en los resultados.

Existen diferentes técnicas de muestreo que tienen sus ventajas, desventajas y usos distintos. A continuación se mencionan las muestras más importantes para el tema de agua residual.

Muestra compuesta: la que resulta de mezclar el número de muestras simples, según lo indicado en la Tabla A-1. Para conformar la muestra compuesta, el volumen de cada una de las muestras simples deberá ser proporcional al caudal de la descarga en el momento de su toma.

Tabla A.1. Frecuencia de muestreo.

Horas por día que opera el proceso generador de la descarga	Número de muestras simples	Intervalo entre toma de muestras simples (horas)	
		MÍNIMO	MÁXIMO
Menor que 4	Mínimo 2	-	-
De 4 a 8	4	1	2
Mayor que 8 y hasta 12	4	2	3
Mayor que 12 y hasta 18	6	2	3
Mayor que 18 y hasta 24	6	3	4

Muestra simple: la que se obtenga de manera continua en el punto de descarga durante un día normal de operación. De esta manera reflejará cuantitativa y cualitativamente el o los procesos más representativos de las actividades generadas por la descarga durante el tiempo suficiente para completar, cuando menos, el volumen que permita llevar a cabo los análisis necesarios y conocer su composición, aforando el caudal descargado en el sitio y el momento del muestreo.

El volumen de cada muestra simple necesario para formar la muestra compuesta se determina mediante la siguiente ecuación:

$$VMSi = VMC \times (Qi/Qt),$$

Dónde:

- VMSi** = volumen de cada una de las muestras simples "i", litros
- VMC** = volumen de cada muestra compuesta necesario para realizar la totalidad de los análisis de laboratorio requerido, litros
- Qt** = $\sum Qi$ hasta Qn , litros por segundo

Ejemplo: Se desea preparar una muestra compuesta para realizar la manifestación del pago de derechos de descarga a la Conagua, los parámetros a analizar y sus volúmenes son los indicados en la tabla A-2 para un proceso que opera las 24 horas. El volumen total requerido de acuerdo a esta tabla es de 3.750 litros, agregándose un excedente de 1.250 litros para el enjuague previo de los recipientes, con lo cual da un volumen total a preparar de cinco litros.

De acuerdo con la tabla A.2, el número de muestras simples son seis, tomadas cada cuatro horas.

Tabla A.2. Ejemplo de cálculo de muestra compuesta.

No. de muestra	Gasto (l/s)	Volumen proporcional (l)	Cálculo
1	200	1.05	$VMSi = 5 * (200/950)$
2	150	0.79	$VMSi = 5 * (150/950)$
3	175	0.92	$VMSi = 5 * (175/950)$
4	200	1.05	$VMSi = 5 * (200/950)$
5	125	0.66	$VMSi = 5 * (125/950)$
6	100	0.53	$VMSi = 5 * (100/950)$
	950	5.00	

Promedio diario (P.D.): es el valor que resulta del análisis de una muestra compuesta. En el caso del parámetro grasas y aceites es el promedio ponderado en función del caudal y la media geométrica para los coliformes fecales y el pH, de

los valores que resulten del análisis de cada una de las muestras simples tomadas para formar la muestra compuesta. Las unidades de pH no deberán estar fuera del rango permisible, en ninguna de las muestras simples.

Promedio mensual (P.M.): es el valor que resulte de calcular el promedio ponderado en función del caudal y de los valores del análisis de al menos dos muestras compuestas (promedio diario).

La frecuencia de muestreo con análisis y de reporte será, en el caso de descargas no municipales, según a la carga de contaminantes de acuerdo con la tabla A-3.

Tabla A.3. Frecuencia de muestreo y análisis y de reporte de efluentes no municipales.

Demanda bioquímica de oxígeno (DBO^o) (toneladas/día)	Sólidos suspendidos totales (toneladas/día)	Frecuencia de muestreo y análisis	Frecuencia de reporte
Mayor que 3.0	Mayor que 3.0	Uno mensual	Uno trimestral
De 1.2 a 3.0	De 1.2 a 3.0	Uno trimestral	Uno trimestral
Menor que 1.2	Menor que 1.2	Uno semestral	Uno trimestral

Tabla C reformada DOF 01-01-2002, 24-12-2007, 11-12- 2013.

Muestreo en descargas libres: cuando las aguas residuales fluyen libremente en forma de chorro, se empleará el siguiente procedimiento:

1. El recipiente muestreador se debe enjuagar repetidas veces antes de efectuar el muestreo.
2. Se introduce el recipiente muestreador en la descarga o, de ser posible, la muestra se toma directamente en su recipiente.
3. La muestra se transfiere del recipiente muestreador al recipiente para la muestra cuidando que esta siga siendo representativa. La muestra debe agitarse constantemente para que no se sedimente.



Figura A.1. Muestreo en descargas libres.

Muestreo en canales y colectores: se recomienda tomar las muestras en el centro del canal o colector, de preferencia en lugares donde el flujo sea turbulento a fin de asegurar un buen mezclado. Si se va a evaluar el contenido de grasas y aceites, se tomarán porciones a diferentes profundidades cuando no haya mucha turbulencia para asegurar una mayor representatividad.

El recipiente muestreador se enjuagará repetidas veces con el agua por muestrear antes de efectuar la toma de muestra.

Aforos: una vez inspeccionado el sitio donde se realizará el monitoreo, se determina el método para la estimación de los caudales; debe adoptarse la forma más práctica de aforar dependiendo del tipo de descarga y en algunos casos adecuar el sitio de muestreo. Los factores que se han de tener en cuenta en el momento de seleccionar un sitio de medición son el tipo de conducto, la accesibilidad y el intervalo de medida que deben cubrir los caudales máximos y mínimos. Debido a que los vertidos de aguas residuales se hacen por gravedad, el método seleccionado deberá producir la mínima pérdida posible de carga.

Los métodos más utilizados son:

Medición volumétrica manual: para este tipo de medición se requiere de un cronómetro y un recipiente aforador. El procedimiento a seguir es tomar un volumen de muestra cualquiera y medir el tiempo transcurrido desde que se introduce a la descarga hasta que se retira de ella; la relación de estos dos valores permite conocer el caudal en ese instante de tiempo. El cálculo del caudal es el siguiente:

$$Q=V/t$$

Este método tiene la ventaja de ser el más sencillo y confiable, siempre y cuando el lugar donde se realice el aforo garantice que el recipiente llegue a todo el volumen de agua que sale por la descarga. Se debe evitar el represamiento que promovería la acumulación de sólidos y grasas.



Figura A.2. Medición volumétrica manual en descargas libres.

Medición en canales abiertos: el vertedero es un canal en el que se coloca una represa cuyo rebosadero puede adoptar distintas formas; el líquido represado alcanzará distintas alturas en función del caudal, establecidas por ecuaciones (tabla A-4) dependientes del tipo de vertedero que puede ser rectangular, triangular o trapezoidal. Los vertederos son de fácil construcción, bajo costo, y buen rango de precisión en líquidos que no contengan sólidos.

Tabla A.4. Ecuaciones según el tipo de vertedero.

Tipo de vertedero	Diagrama	Ecuación
Rectangular con contracción		$Q = 1,83 * L * H^{1,5}$ Q = caudal en m ³ /seg L = longitud de cresta, m H = cabeza en m
Rectangular sin contracción (cuando cae por una pared)		$Q = 13,3 * L * H^{1,5}$ Q = caudal en m ³ /seg L = longitud de cresta, m H = cabeza en m
Triangular		$\phi = 90^\circ$ $Q = 1,4 * L * H^{5/2}$ Q = caudal en m ³ /seg H = cabeza en m $\phi = 60^\circ$ $Q = 0,775 * H^{2,47}$ Q = caudal en m ³ /seg H = cabeza en m
Trapezoidal		Si la pendiente de los lados tiene una relación 4 _(vertical) /1 _(horizontal) , se aplica: $Q = 1,859 * L * H^{1,5}$ Q = caudal en m ³ /seg L = longitud de cresta, m H = cabeza en m
Cresta gruesa		$Q = 1,67 * L * H^{1,5}$ Q = caudal en m ³ /seg L = longitud de cresta, m H = cabeza en m

Medición por velocidad: la canaleta Parshall es el dispositivo ideal para usar en canales abiertos para monitoreo continuo de caudal. La fórmula general para calcular es:

$$Q=4WHn$$

Donde:

Q= caudal en pies cúbicos por segundo

W= ancho de la garganta en pies

H= altura en pies

n= 1.522*W (0.026)

Medición de la velocidad con correntímetro o molinete: es un dispositivo constituido por una serie de hélices las cuales giran al estar en contacto con una corriente de agua. El número de revoluciones será proporcional a la velocidad de la corriente. En estos medidores la relación entre la velocidad del agua y el número de revoluciones está dada por:

$$Q=V*A$$

Donde:

Q= caudal

V= velocidad

A= área de la sección transversal

A= $W*(\sum Hi)/n$

Donde:

W= ancho del canal, m

Hi= profundidad de cada vertical, m

n= número de puntos de medición o verticales

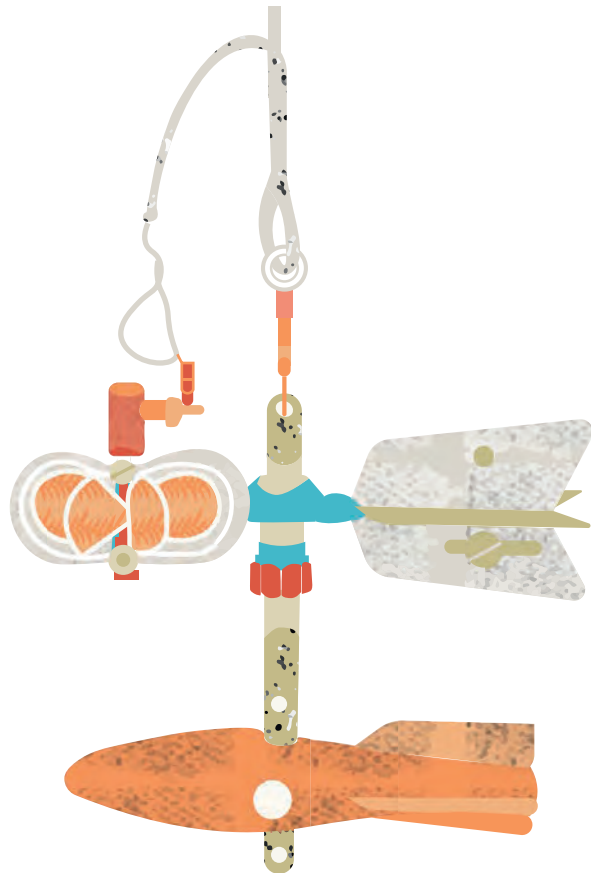








Figura A.3. Molinete.

La velocidad se determina a partir de la ecuación del molinete así:
 $V=a+bn$ V =velocidad del agua en m/s, a y b constantes de calibración del equipo y n = # de revoluciones /s.

El tramo o la sección a medir debe ser canal abierto, de fácil acceso y sin turbulencia. Medir el ancho de la sección y dividirla en cuatro franjas, tomando las distancias entre cada punto. Medir la altura de la lámina de agua en la parte central de cada una de estas franjas. Ajustar el molinete y medir el número de revoluciones en un minuto; medir mínimo dos veces cada punto.

Cuando se utiliza este método, se deben tener en cuenta las siguientes consideraciones:

-  No debe existir obstáculo sobre la corriente que altere el paso del agua.
-  Seleccionar una sección en la que las orillas del canal sean paralelas.
-  Evitar secciones con presencia de turbulencia excesiva.
-  Tender una cuerda sobre el canal que señale la sección transversal de control seleccionada. Esta cuerda debe permanecer amarrada para permitir la determinación de los puntos de medición de velocidad de la corriente. Medir con la cinta métrica el ancho total. Se establece el número de espacios entre los puntos en los que se medirá con el molinete la velocidad del agua.
-  Para un canal de fondo plano sin diferencia de profundidades a lo largo de la sección transversal, se toma la velocidad de la corriente con el molinete sobre una misma posición en el canal.
-  Para un canal de fondo irregular o con diferencia de profundidad, se toman entre tres y seis datos de velocidad con el molinete, según el ancho del canal. Para esto dividir el ancho de la sección transversal y tomar mediciones de velocidad y profundidad del canal en cada una de estas y finalmente determinar su caudal, como se presenta en la fórmula.

Muestreo manual: el muestreo manual se realiza por una persona entrenada para recolectar las muestras en los sitios y tiempos definidos. Esto implica la necesidad de un desplazamiento continuo del muestreador durante el tiempo en el que se obtienen las muestras simples o compuestas. El procedimiento utilizado para el muestreo en corrientes es el siguiente:

1. Se recomienda determinar primero el flujo en el centro de la corriente, midiendo con el estadal marcando la profundidad total y se procede a ajustar la posición del medidor de velocidad a un tercio de la profundidad total.
2. Se introduce en el agua el recipiente muestreador en el mismo sitio y a la misma altura donde se mide el flujo.
3. Se sube el muestreador y se enjuaga con el agua colectada.
4. Enseguida se toma la muestra y se determinan los parámetros de campo a analizar.

5. La muestra se transfiere al recipiente con ayuda de un embudo y se enjuaga tres veces antes de depositar el volumen adecuado.
6. Se repite el procedimiento de muestreo hasta llenar el recipiente para los análisis de laboratorio, utilizando los procesos de preservación indicados.
7. Los recipientes de muestreo deberán ser identificados, previa entrega al laboratorio, por medio de una etiqueta autoadherible e impermeable, de tal manera que al momento de tomar la muestra los datos correspondan a los sitios previamente seleccionados anotando, con marcador a prueba de agua, la fecha y la hora en que se tomó la muestra y los parámetros a analizar.

Las etiquetas deben contener los siguientes datos: fecha, hora de toma de muestra, nombre del muestreador, clave de la muestra, preservación, parámetro y número de control (figura A-4).

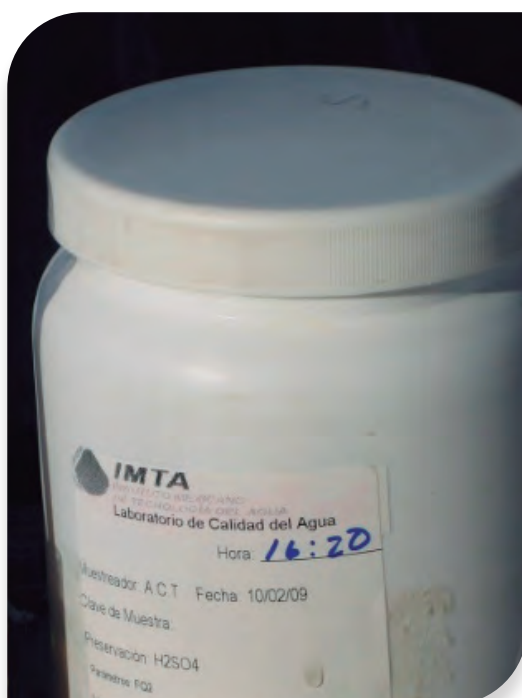


Figura A.4. Ejemplo de etiqueta.

Preservación de muestras: las muestras se preservan con el objeto de detener o retardar las reacciones químicas que sufren después de su recolección y que podrían alterar su composición original. En la tabla A-5 se detalla el tipo de recipientes, los preservadores a utilizar, el tiempo máximo de conservación y el volumen mínimo de muestra para cada parámetro de análisis.

Si la muestra se preserva en el campo, se debe observar el siguiente procedimiento:



Los reactivos de preservación deben adicionarse con pipetas o goteros con escala a cada recipiente.



Figura A.5. Preservación de muestras.

- 🐱 El preservador debe ser de grado reactivo analítico o de alta pureza.
- 🐱 Es necesario utilizar reactivos recientes para cada muestreo.
- 🐱 Después de la adición de los reactivos se debe verificar el pH, utilizando papel pH o potenciómetro de campo. Si es necesario, debe adicionarse más reactivo para alcanzar el pH indicado en la tabla A-5.
- 🐱 Se registrará la cantidad adicional en el mismo lote de reactivo para todas las muestras.
- 🐱 La misma cantidad de preservador se añadirá a todos los blancos correspondientes.
- 🐱 La preservación con ácidos se realizará en un área ventilada o en una campana de extracción. Cualquier reacción inusual se registrará en las bitácoras u hojas de campo.
- 🐱 Todos los reactivos para la preservación de las muestras se transportarán en recipientes de plástico o de teflón para evitar su rompimiento y en contenedores diferentes a los del transporte de las muestras.



Figura A.6. Material de muestreo.

Tabla A.5. Tiempo de almacenamiento, preservación y volumen de muestra.

Parámetro	Recipiente	Vol. min muestra	Tipo de muestra	Preservación	Tiempo de conservación recomendado/ EPA
Grasas y aceites	Vidrio boca ancha	1,000 ml	Simple	Refrigeración 4 °C HCl, pH<2	28 días
Sólidos sedimentables	Plástico, vidrio	1,000 ml	Simple	Refrigeración 4 °C	24 h/7 días
Sólidos suspendidos totales	Plástico, vidrio	600 ml	Simple, compuesta	Refrigeración 4 °C	7 d
DBO	Plástico, vidrio	1,000 ml	Simple	Refrigeración 4 °C	6 h/48 h
DQO	Plástico, vidrio	100 ml	Simple, compuesta	H ₂ SO ₄ pH<2	7 d/28 d
Nitrógeno total	Plástico, vidrio	2,000 ml	Simple, compuesta	H ₂ SO ₄ pH<2	30 d
Fósforo total	Plástico	600 ml	Simple compuesta	Refrigeración 4 °C H ₂ SO ₄ pH<2	28 d
Coliformes	Plástico	300 ml	Simple	Refrigeración	24 h
Huevos de helmintos	Plástico	5,000 ml	Simple compuesta	Refrigeración 4 °C	2 meses
Cianuros	Plástico, vidrio	1,000 ml	Simple, compuesta	NaOH pH>12	24 h/14 d
Metales pesados	Plástico, vidrio	1,000 ml	Simple, compuesta	HNO ₃ pH<2	6 meses

Plan de muestreo: es indispensable contar con la información sobre las características de la descarga que se va a verificar, ya sea industrial o municipal. En el primer caso sería conveniente conocer el volumen de producción, tipo de productos que manejan, tipo de tratamiento que le dan al agua antes de descargar, ubicación de la descarga, horas de trabajo de la industria, etcétera. Parte de esta información se puede obtener en el Registro Público de Derechos del Agua (Repda).

Es importante localizar la descarga para determinar las posibilidades de tomar las muestras directamente de ella o si es inaccesible. En el último caso se tendría que localizar un punto manejable, lo más cercano posible y representativo de la

descarga. La información adquirida servirá para inferir el tipo de contaminantes que se pudieran esperar en la descarga, el tiempo de descarga, y otros datos que permitirán seleccionar el material, el equipo de muestreo y de seguridad. Con dicha información se elabora el plan de muestreo:

- Objetivo
- Antecedentes
- Tipo del muestreo
- Control de calidad
- Ubicación y descripción del sitio de muestreo
- Medio de transporte
- Participantes
- Plan de seguridad
- Lista de verificación de materiales, reactivos y equipo para el muestreo

LABORATORIO DE CALIDAD DEL AGUA PLAN DE MUESTREO

Ciente o proyecto:

No. de control:

Dirección:

Fecha de entrega:

Objetivo:

Elaboró:

VoBo Resp. del proyecto:

Justificación:

Antecedentes:

Visita prospectiva:

Edición: D M A Sustituye a: D M A Revisión: Hoja 1 de 3
 13 05 2013 17 06 2011 04

LABORATORIO DE CALIDAD DEL AGUA PLAN DE MUESTREO

Personal participante y asignación de actividades

Nombre	Actividad	Fecha de cumplimiento
	<i>Responsable de muestreo</i>	
	<i>Preparación de envases</i>	
	<i>Preparación y calibración de equipo</i>	
	<i>Preparación de reactivos o soluciones para preservar</i>	
	<i>Preparación de hojas de campo</i>	
	<i>Responsable de la entrega de muestras</i>	
	<i>Muestreador</i>	
	<i>Muestreador</i>	

Personal participante y asignación de actividades

Nombre	Actividad	Fecha de cumplimiento

Datos generales

Lugar de muestreo:	Fecha de muestreo:	Fecha de entrega de muestras:	Tipo de muestra. Agua de: POZO <input type="checkbox"/> POTABLE <input type="checkbox"/> RES. INDUST. <input type="checkbox"/> RESIDUAL MUNIC. <input type="checkbox"/> DE MAR <input type="checkbox"/> SEDIMENTO <input type="checkbox"/> SUELO <input type="checkbox"/> TEJIDO ANIMAL <input type="checkbox"/> TEJIDO VEGETAL <input type="checkbox"/> OTRO:
Tipo de muestreo: Simple () Compuesto ()	Número total de muestras: Simples: Compuestas:	Número total de frascos: Simples: Compuestas:	Se comparará con la norma: NA
Edición: D M A 13 05 2013	Sustituye a: D M A 17 06 2011	Revisión: Hoja 2 de 3 04	

FCAMT4-01









LABORATORIO DE CALIDAD DEL AGUA PLAN DE MUESTREO








FQ1: (preservación: solo hielo)		FQ2: (preservación: con H₂SO₄)		COSV Compuestos Orgánicos Semivolátiles: (preservación solo hielo)	
Sólidos Totales <input type="radio"/> Volátiles <input type="radio"/> Fijos <input type="radio"/>		Sustancias Activas Azul Metileno (SAAM) <input type="radio"/>		Compuestos Orgánicos Semivolátiles, Barrido Cualitativo <input type="radio"/>	
Sólidos Suspendidos Totales <input type="radio"/> Volátiles <input type="radio"/> Fijos <input type="radio"/>		Nitrógeno Total <input type="radio"/>		Compuestos Orgánicos Semivolátiles, Barrido Cuantitativo <input type="radio"/>	
Sólidos Disueltos Totales <input type="radio"/> Volátiles <input type="radio"/> Fijos <input type="radio"/>		Nitrógeno Orgánico <input type="radio"/>		Plaguicidas Organoclorados <input type="radio"/>	
Sólidos Sedimentables <input type="radio"/>		Nitrógeno Amoniacal <input type="radio"/>		Hidrocarburos Poliaromáticos <input type="radio"/>	
Hidróxidos <input type="radio"/> Carbonatos <input type="radio"/> Bicarbonatos <input type="radio"/>		Nitrógeno Total KJELDAHL <input type="radio"/>		2, 4-D <input type="radio"/>	
Cromo Hexavalente <input type="radio"/>		Nitrógeno de Nitratos más Nitritos como Hexavalente <input type="radio"/>		Otro: <input type="radio"/>	
Fósforo (orto) <input type="radio"/>		Demanda química de oxígeno <input type="radio"/>		COV Compuestos Orgánicos Volátiles (preservación con HC)	
Fósforo Total <input type="radio"/> Orgánico <input type="radio"/> Hidrolizable <input type="radio"/>		FQ3: (preservadas con HCl)		Compuestos Orgánicos Semivolátiles, Barrido Cualitativo <input type="radio"/>	
Fosfatos Totales <input type="radio"/>		Grasas y Aceites <input type="radio"/>		Compuestos Orgánicos Semivolátiles, Barrido Cuantitativo <input type="radio"/>	
Fluoruros <input type="radio"/>		Hidrocarburos Totales del Petróleo <input type="radio"/>		Trihalometanos <input type="radio"/> BTEX <input type="radio"/>	
Conductividad Eléctrica <input type="radio"/>		AA: (preservadas con HO₃)		Otro: <input type="radio"/>	
Nitrógeno de Nitritos <input type="radio"/>		Dureza Total <input type="radio"/>		Microbiología	
Nitrógeno de Nitratos <input type="radio"/>		Dureza Calcio <input type="radio"/>		Preservación: sólo hielo	
Acidez Total <input type="radio"/>		Dureza Magnesio <input type="radio"/>		Coliformes fecales UFC <input type="radio"/> NMP <input type="radio"/>	
Alcalinidad Total <input type="radio"/>		OTROS: (diferentes preservaciones y envases)		Coliformes Totales UFC <input type="radio"/> NMP <input type="radio"/>	
Acidos Volátiles <input type="radio"/>		Fenoles Totales <input type="radio"/>		E.coli <input type="radio"/>	
Cloruros <input type="radio"/>		Sulfuros <input type="radio"/>		Enterococos fecales <input type="radio"/> Salmonella <input type="radio"/>	
Color Aparente <input type="radio"/>		Oxígeno Disuelto <input type="radio"/>		Shigella <input type="radio"/>	
Color verdadero <input type="radio"/>		Demanda Química de Oxígeno <input type="radio"/>		Otros <input type="radio"/>	
Materia Orgánica <input type="radio"/>		Demanda Química de Oxígeno Soluble <input type="radio"/>		Otros: diferentes preservaciones y envases	
Demanda Bioquímica de Oxígeno Soluble (DBO ₅ SOL) <input type="radio"/>				Huevos de Helminito <input type="radio"/>	
				Vidrios cholerae <input type="radio"/>	
				Otros <input type="radio"/>	
				Toxicología	
				Preservación: Varias	
				Toxicidad: Vidrio fishen <input type="radio"/>	
				Daphnia magna <input type="radio"/>	
				Sseudokirchneriella Subcapitata <input type="radio"/>	
				Mutagenicidad <input type="radio"/> Otro <input type="radio"/>	
				Clorofila-a <input type="radio"/> Cuantificante Algas <input type="radio"/>	

Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO ₅)	<input type="radio"/>	Q.A Orgánicos		Absorción Atómica					
Boro	<input type="radio"/>	Otros: (preservación: con H₂SO₄) o H₃PO₄)		AA: (preservadas con HNO₃)					
Sulfatos	<input type="radio"/>	Carbono Orgánico Total	<input type="radio"/>	As Cd Cu Cr Hg Ni Pb Zn Ag Al Ba					
Turbiedad	<input type="radio"/>	Carbono Total	<input type="radio"/>	Be Bi Ca Co Fe K Li Mg Mn Mo Na					
		Carbono Inorgánico	<input type="radio"/>	Se Sb Si Ti V Sn W					
Parámetros de campo:		Potencial de Hidrógeno pH <input type="radio"/>	Conductividad Eléctrica C.E <input type="radio"/>	Cloro Residual <input type="radio"/>					
		Temperatura <input type="radio"/>	Gasto <input type="radio"/>	Otro <input type="radio"/>					
Observaciones:									
Edición:	D 13	M 05	A 2013	Sustituye a:	D 17	M 06	A 2011	Revisión: 04	Hoja 3 de 3

Figura A.7. Ejemplo de Plan de Muestreo.

Registros de campo: es el formato que permite identificar el origen de la muestra y sus datos obtenidos en campo. En este formato se especifican también los parámetros requeridos para su análisis en el laboratorio (figura A-3). Estos registros contienen los siguientes datos:

-  Nombre de la muestra, muestreador y todo el personal participante en la colección de la muestra
-  Fecha y hora del muestreo
-  Condiciones del campo: clima, descripción exacta del sitio de muestreo o cualquier información importante necesaria para la correcta ubicación del sitio de muestreo
-  Descripción específica de la localidad del muestreo: dirección, sitio del muestreo, puntos exactos de muestreo, etcétera
-  Tipo de muestra: simple o compuesta para esta última anotar los intervalos, volúmenes de las submuestras y la duración de su preparación
-  Parámetros analíticos requeridos, tipo y número del recipiente, técnicas de preservación
-  Preparación del preservador e información acerca de los reactivos utilizados
-  Verificación del pH en las muestras preservadas y el valor medido de pH. Si se utilizan reactivos adicionales para ajustar el pH, se debe indicar la cantidad de preservadores adicionados, de tal manera que se prepare un blanco con la adición de estos preservadores

-  Orden secuencial en el que se tomaron las muestras. Cada muestra debe tener un número consecutivo
-  Junto con el número consecutivo, a cada muestra se le debe dar una identificación de campo con el análisis requerido. Si se toman muestras duplicadas, se deben identificar adecuadamente
-  Si se toman muestras divididas, se deben describir e identificar
-  Información acerca de la preparación y del valor real de las muestras de control de calidad de campo que se usen para verificar la exactitud de las determinaciones de campo
-  Las muestras de campo adicionadas también se identificarán apropiadamente
-  Datos de mediciones de campo: pH, temperatura, conductividad, oxígeno disuelto, cloro residual, etcétera
-  Lista del equipo de muestreo automático utilizado y de las purgas realizadas antes de proceder a tomar las muestras

Las determinaciones en campo requieren del uso de equipos, tales como potenciómetro, termopar, termistor y conductímetro, mismos que se recogerán, revisarán y calibrarán en las 24 horas previas al muestreo. Además, se recalibrarán en campo antes de usarse. Revise todo el equipo electrónico y el estado de las baterías o pilas para que operen apropiadamente. Inspeccione las columnas de mercurio de los termómetros y verifique que se encuentren calibrados y con certificado de calibración vigente.

Si usted tiene duda sobre las condiciones de un equipo en particular, lleve un reemplazo. Todo equipo que tenga contacto con una muestra debe limpiarse debida y cuidadosamente antes de reusarlo, esto se hace lavándolo tres o más veces con agua destilada o desionizada. Siempre descontamine el equipo antes de usar, enjuagando varias veces con agua destilada o desionizada.

Blancos de equipo: se utilizan para detectar cualquier contaminación relacionada con el equipo de muestreo. Un blanco por cada veinte muestras del parámetro en cuestión.

Blancos de viaje: verificar si ocurre contaminación durante la colección o transporación. Se prepara en el laboratorio, antes de iniciar el viaje.

Blancos de campo: se prepara con agua desionizada y el recipiente se deja abierto el tiempo que dure la toma de muestras en el sitio de muestreo. Los blancos de campo se preservan de la misma manera que las muestras de estudio.

Bitácora de campo: en ella se registra toda la información referente a las observaciones de campo o del muestreo. Debe incluir como mínimo lo siguiente:

Registro de campo

Fecha de muestreo:	Nombre/firma muestrador:	Resp. de entrega de muestras:
Fecha de recepción: (área sombreada sólo G.C.)	Hora: Nombre / Firma Receptor	Control No.:

Cliente y/o proyecto:

Tipo de muestra:

No.	Nombre muestra	Hora	No. Recipientes por preservación						Parámetros de campo					
			Solo hielo MB FQ HB CG	H ₂ SO ₄	HCl	HNO ₃	H ₂ SO ₄ + CuSO ₄	NaOH+ AcOZn	Temp. °C	pH	C.E µS/cm	M. flotante Presencia / Ausencia	Gasto l/s	

Parámetro por preservación: () De acuerdo con el plan de muestreo () De acuerdo con cotización Num __

Sólo hielo: _____
 H₂SO₄: _____
 HNO₃: _____
 HCl: _____
 H₂SO₄ + CuSO₄: _____
 NaOH + AcOZn: _____
 Otros: _____

Verificación	Preservación		Identificación		Recipiente		Volumen		Tiempo	
	C	NC	C	NC	C	NC	C	NC	C	NC

Observaciones: El laboratorio no se hace responsable de los resultados emitidos para las muestras: _____ para los parámetros: _____ debido a que: ● llegaron fuera del tiempo máximo permitido para su análisis ● mal preservadas ● menor al volumen requerido ● otro ●

Fecha edición: D M A Sustituye a: D M A Revisión: 09
 06 07 06 23 08 04

Figura A.8. Ejemplo de un registro de campo.

LABORATORIO DE CALIDAD DEL AGUA CADENA DE CUSTODIA DE CAMPO

		Plástico		Vidrio		Estériles	
Recipientes de muestreo:	Área, firma y fecha:	Cant. :	Área, firma y fecha:	Cant. :	Área, firma y fecha:	Cant. :	
	Área, firma y fecha:	Cant. :	Área, firma y fecha:	Cant. :	Área, firma y fecha:	Cant. :	
	Área, firma y fecha:	Cant. :	Área, firma y fecha:	Cant. :	Área, firma y fecha:	Cant. :	
Preparación	H ₂ SO ₄ :	Lote:	Área, firma y fecha	AcOZn	Lote:	Área, firma y fecha	OTRO: Lote: Área, firma y fecha
	HCl:	Lote:	Área, firma y fecha	NaOH	Lote:	Área, firma y fecha	OTRO: Lote: Área, firma y fecha
	HNO ₃ :	Lote:	Área, firma y fecha	H ₂ O Desionizada	Lote:	Área, firma y fecha	OTRO: Lote: Área, firma y fecha
Recibe:	Nombre y Firma			Fecha:			
Empaque		Transporte			Recepción		
No. hielera	No. frascos	Fecha	Hr.	No. hielera	Fecha	Hr.	Muestras recibidas y total de recipientes
							Parámetro Núm. muestra Total
							FQ 1
							FQ 2
							DQO
							FENOLES
							G y A

Firma:	Firma:	SULFUROS								
Nombre:	Nombre:	COV								
		COSV								
		MICROBIOL								
Observaciones		TOXICIDAD								
		METALES								
		DT								
		TOTAL DE RECIPIENTES								
		Firma:								
		Nombre: Socorro L.A. (), Fernando F.P. (), Nora Bahena								
Fecha de edición	D	M	A	Sustituye a:	D	M	A	Revisión	Hoja:	de:
	06	07	06		23	08	04	09		

FCAMT4-01.



Figura A.9. Bitácora de campo.

- Propósito del muestreo
- Número de acta de visita
- Si se trata de un efluente industrial, se debe anotar la localización de la descarga o el punto de muestreo
- Dirección y nombre del representante de la empresa
- Tipo de muestra
- Método de preservación
- Identificar el proceso que produce el efluente
- Estipular la posible composición de la muestra
- Número y volumen de muestras tomadas
- Descripción del método de muestreo
- Fecha y hora de recolección
- Nombre de los colectores de las muestras

Asimismo, anotar la preservación que se realizó, si está completa la identificación de la muestra, si el tipo de recipiente que se usó es el adecuado, si cumple con el volumen requerido y si se entregaron a tiempo las muestras al laboratorio seleccionado para su análisis.

Muestreo y análisis de lodos y biosólidos: en las actividades de la operación de las PTAR se generan volúmenes de lodos mezclados con excretas de las granjas porcícolas que, en caso de no darles una disposición final adecuada, contribuyen de manera importante a la contaminación de la atmósfera, de las aguas y de los suelos, afectando los ecosistemas del área donde se depositen. Se ha considerado que los lodos y excretas por sus características propias o adquiridas, después de un proceso de estabilización, pueden ser susceptibles de aprovechamiento siempre y cuando cumplan con los límites máximos permisibles de contaminantes establecidos en la NOM-004-SEMARNAT-2002 o, en su caso, se dispongan en forma definitiva como residuos no peligrosos para atenuar sus efectos contaminantes del medio ambiente y así proteger a la población en general.

El generador de lodos y biosólidos debe realizar por medio de laboratorios acreditados los muestreos y análisis correspondientes para demostrar el cumplimiento de la presente Norma Oficial Mexicana y deberá conservar los registros por lo menos los siguientes cinco años posteriores a su realización.

La frecuencia de muestreo y análisis para los lodos y biosólidos se establecerá en función del volumen de lodos generados como se aprecia en la tabla A.6.

Tabla A.6. Frecuencia de muestreo y análisis para lodos y biosólidos.

Volumen generado por año (Ton/Año) en base seca	Frecuencia de muestreo y análisis	Parámetros a determinar
Hasta 1,500	Una vez al año	Metales pesados, indicador bacteriológico
Mayor que 1,500 hasta 15,000	Una vez por semestre	de contaminación, patógenos y parásitos
Mayor que 15,000	Una vez por trimestre	Metales pesados, indicador bacteriológico

El muestreo de lodos y biosólidos, consiste en obtener una porción del volumen generado que debe conservar la integridad de todos sus constituyentes desde el momento en que es tomada la muestra (parte representativa de un universo o población finita obtenida para conocer sus características) y hasta el final de su análisis o determinación en laboratorio. El tiempo en que éstas permanezcan estables dependerá de sus características y método de preservación. El muestreo constituye una parte integral y fundamental para evaluar la calidad de los lodos y los biosólidos, previamente a su depósito final.

El tamaño y número de muestras dependen de las fuentes generadoras, así como de los procesos utilizados para su estabilización. Es importante considerar la selección del sitio de muestreo, la homogeneidad y representatividad de la muestra, el grado de degradación, el volumen, tipo de análisis y la accesibilidad al sitio seleccionado para el muestreo.

Equipo: báscula con capacidad mínima de 100 kg y precisión de 10 g. Báscula con capacidad mínima de 10 kg y precisión de 1 g y criba M 2.00 según Norma Mexicana NMX-B-231-1990.

Materiales:

Bolsas de polietileno de 0.70 m x 0.50 m y calibre mínimo del No. 200
Bolsas de polietileno de 1.10 m x 0.90 m y calibre mínimo del No. 200
Botas de hule, brocha de tamaño adecuado para la limpieza
Cascos de seguridad
Escobas
Guantes de carnaza
Ligas de hule de 1.5 mm de ancho
Marcadores de tinta permanente, preferentemente color negro
Mascarillas protectoras
Overoles
Papelería y varios (formatos de muestreo, registro de campo, marcadores, ligas, otros)
Palas curvas
Recogedores
Tambos metálicos de forma cilíndrica, con capacidad de 20 l

En el caso de coliformes fecales utilizar bolsas de polietileno estéril sin pastilla de tiosulfato o recipientes de polietileno o propileno inerte, de boca ancha y con tapa y cierre hermético, de 500 ml de capacidad y susceptibles de ser esterilizados en autoclave.

En el caso de metales utilizar recipientes de polietileno o propileno inerte o de vidrio, de boca ancha, con tapa y cierre hermético, de 50 ml.

En el caso de huevos de helmintos, sólidos y tasa específica de absorción de oxígeno (TEAO) utilizar recipientes de polietileno o propileno inerte, de boca ancha y con tapa y cierre hermético, de 500 ml de capacidad.

Tipos de lodo

Muestras líquidas o semisólidas: coleccionar la muestra directamente del vertedor en un recipiente de plástico de 20 l hasta obtener, como mínimo, el doble del volumen por utilizar para cada uno de los análisis.

Tuberías: coleccionar la muestra directamente de la tubería a través del grifo de purga que presente un diámetro interno mínimo de 3.8 cm.

Canales: coleccionar la muestra en el vertedor o en otro punto donde el lodo esté bien mezclado.

Digestores: coleccionar la muestra de un tanque mezclado que es alimentado a través de líneas provenientes de diferentes niveles en el digestor. Antes del muestreo eliminar con toda seguridad el lodo acumulado previamente en las líneas.

Tanques: mezclar completamente el tanque y coleccionar varias muestras a diferentes profundidades y puntos. Juntar todas las muestras en una sola antes de realizar el análisis.

Lodos de sitios específicos en plantas de tratamiento: los siguientes puntos de muestreo se recomiendan para el muestreo de lodo en plantas de tratamiento de agua residual.

Lodo primario: conducir el lodo desde el tanque de estabilización hasta el cárcamo antes del bombeo, mezclar perfectamente y coleccionar una muestra representativa en ese punto. Alternativamente coleccionar muestras de la bomba de lodos y de las tuberías cercanas a éstas.

Lodo activado: coleccionar muestras en el cárcamo de bombeo, en la bomba o tubería adyacente y en el punto de descarga de los lodos de retorno al afluente primario. El punto de muestreo se debe localizar en una región de buena agitación para la suspensión de sólidos.

Lodo digerido: coleccionar muestras en la tubería de descarga del digester al equipo o lechos de secado.

Lodos del lecho de secado: coleccionar muestras del mismo tamaño en diferentes puntos del lecho sin incluir arena. Mezclar en su totalidad.

Lodo filtrado: coleccionar porciones del mismo tamaño (utilizar cortadores de galletas) en la descarga del filtro.

Azolves: aplica cuando ha sido extraída una muestra representativa de la zona donde se encuentran depositados.

Muestras sólidas: para conformar las muestras se usa el método del cuarteo: se toman de 4 a 8 bolsas de polietileno de 0.70 m x 0.50 m o de 1.10 m x 0.90 m y se selecciona al azar el mismo número de sitios diferentes. Posteriormente se llena cada una de las bolsas con el material de cada sitio y se trasladan a un área plana horizontal de aproximadamente 4 m x 4 m, preferentemente de cemento pulido o similar y bajo techo y se deposita su contenido en montículo.

Traspalear el material con pala o biello para obtener una mezcla homogénea. A continuación, dividir en cuatro partes aproximadamente iguales A, B, C y D y eliminar las partes opuestas A y C o B y D. Repetir esta operación hasta dejar 10 kg aproximadamente de lodo o biosólido. La pila resultante sirve para determinar en el laboratorio el contenido de coliformes fecales, *Salmonella ssp*, huevos de helmintos, contenido de sólidos totales y sólidos volátiles, arsénico, cadmio, cromo, cobre, plomo, mercurio, níquel y zinc. El material restante se usa para determinar el peso volumétrico de los lodos *in situ*.

Trasladar la muestra al laboratorio en bolsas de polietileno debidamente selladas e identificadas. Evitar que queden expuestas al sol durante su transporte, además tener cuidado en el manejo de la bolsa que contiene la muestra para que no sufra ninguna ruptura. El tiempo máximo de transporte de la muestra al laboratorio no debe exceder de 8 horas.

Antes de ser procesada la muestra se le determinará el contenido de sólidos totales en por ciento en peso; para el caso del TEAO el contenido de éstos deberá ser menor o igual al 2 %.

Cálculos: para determinar el peso volumétrico del lodo se utilizan recipientes limpios, sin abolladuras. La báscula empleada deberá estar nivelada.

A continuación se pesa el recipiente vacío, tomando este peso como la tara del recipiente. Se llena hasta el tope con el lodo homogeneizado obtenido de las

Tabla A.7. Recipientes, volúmen, preservación y tiempo de análisis.

Parámetro	Recipiente	Vol. mín. muestra	Preservación	Tiempo de conservación recomendado/EPA
Coliformes fecales y <i>Salmonella spp.</i>	Polietileno o polipropileno inerte	500 ml	Refrigeración 4 °C	48 horas
Huevos de helmintos	Polietileno o polipropileno inerte	500 ml	Refrigeración 4 °C	30 días
Sólidos totales	Polietileno o polipropileno inerte	500 ml	Refrigeración 4 °C	24 horas
Sólidos volátiles	Polietileno o polipropileno inerte	500 ml	Refrigeración 4 °C	24 horas
Arsénico, cadmio, cobre, cromo, níquel, plomo y zinc	Polietileno o polipropileno inerte vidrio	50 ml	Refrigeración 4 °C	180 días
Mercurio	Polietileno o polipropileno inerte vidrio	50 ml	Refrigeración 4 °C	13 días a (plástico) 38 días b (vidrio)
Tasa específica de absorción de oxígeno **	Polietileno o polipropileno inerte vidrio	50 ml	No requiere	Inmediato

partes eliminadas del primer cuarteo descrito anteriormente.

El recipiente se golpea contra el suelo tres veces dejándolo caer desde una altura de 10 cm. Llenar hasta el tope teniendo cuidado de no presionar al colocarlo en el recipiente; esto con el fin de no alterar el peso volumétrico que se pretende determinar.

Es importante vaciar dentro del recipiente todo el material, sin descartar los finos.

Para obtener el peso neto del lodo, se pesa el recipiente con éstos y se resta el valor de la tara. Cuando no se tenga suficiente cantidad de material para llenar el recipiente se marca en éste la altura alcanzada y se determina dicho volumen.

El peso volumétrico del lodo se calcula mediante la siguiente fórmula:

$$P_v = V/P$$

Donde:

P_v: peso volumétrico del lodo, en kg/m³

P: peso del lodo (peso bruto menos tara), en kg

V: volumen del recipiente, en m³

BIBLIOGRAFÍA

- Aguilar, Y., Bautista, F., Díaz-Pereira, E. (2011). Soils as natural reactors for swine wastewater treatment. *Tropical and subtropical agroecosystems* 13, 199-210.
- Aguilar, Y., Bautista, F., Mendoza, M. E., Frausto, O., Ihl, T., Delgado, C. (2016). IVAKY: índice de la vulnerabilidad del acuífero kárstico yucateco a la contaminación. *Revista Mexicana de Ingeniería Química*, 15, 913-933. <http://www.redalyc.org/pdf/620/62048168021.pdf>.
- Akunna, Joseph C (2019). Anaerobic waste-wastewater treatment and biogas plants. Practical Handbook. CRC Press, Boca Ratón. ISBN 9781351170512 (Adobe PDF).
- Alonso-Estrada, Dania, & Lorenzo-Acosta, Yaniris, & Díaz-Capdesuñer, Yasser Miguel, & Sosa-Cáceres, Roberto, & Angulo-Zamora, Yamila (2014). *Tratamiento de residuales porcinos para la producción de biogás*. ICIDCA. Sobre los Derivados de la Caña de Azúcar, 48(3),16-21. [fecha de Consulta 29 de Mayo de 2021]. ISSN: 0138- 6204. Disponible en: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=223132853003>
- Araque, Humberto Eloy. (2006). Comportamiento productivo de cerdas gestantes y lactantes estabuladas y a campo, alimentadas con materias primas alternativas. Maestría Sección Publicaciones Oficiales Tesis de Grado Universidad Central de Venezuela, Facultad de Agronomía y Ciencias Veterinarias.,
- Araque, H.; González, C.; Sulbaran, L.; Quijada, J.; Viloria, F. y Vecchionacce, H. (2006). Alojamiento alternativo e impacto ambiental en la producción alternativa de cerdos. <https://www.researchgate.net/publication/238795469>. Enero, 2006.
- Aubry G., Lessard P., Gilbert Y., Le Bihan Y., and Buelna G. (2006). *Nitrogen behaviour in a trickling biofilter treating pig manure. In Proceedings of the IWA Conference BIOFILMS Systems VI*, Amsterdam, Water Science and Technology
- Barrena Gurbillón, Miguel Ángel, Perci Salazar Salazar, Wildor Gosgot Ángeles, Carla María Ordinola Ramírez, Milton Huanes Mariños (2019). Diseño del biodigestor tipo laguna cubierta para el Establo de la Universidad Nacional Toribio Rodríguez de Mendoza, Chachapoyas, Amazonas. *Rev. de investig. agroproducción sustentable* 3(2): 63-70, 2019 ISSN: 2520-9760.
- Batista, F. (2018). Amenazas y vulnerabilidad de contaminación del acuífero kárstico del estado de Yucatán. Centro de Investigaciones en Geografía Ambiental, UNAM. <http://geoint.mx/site/publicacion/id/69.html>

- Batllori-Sampedro, E., (2016). Capítulo 7. Condiciones actuales del agua subterránea en la península de Yucatán, en M. Chávez-Guzmán (ed.). *El manejo del agua a través del tiempo en la península de Yucatán*. Mérida, UADY/Fundación Gonzalo Río Arronte/Consejo de la Cuenca de la Península de Yucatán, pp. 201-225.
- Bautista, F., Frausto, O., Ihl, T., Aguilar, Y. (2015). Actualización del mapa de suelos del Estado de Yucatán México: enfoque geomorfopedológico y WRB. *Ecosistemas y Recursos Agropecuarios*, 2, 303-315.
- Bautista, F., Palacio-Aponte, G., Quintana, P., Zinck, A.J., (2011). Spatial distribution and development of soils in tropical karst areas from Peninsula of Yucatan, Mexico. *Geomorphology*, 135, 308-321.
- Beyli, M.E. J. Brunori, D. Campagna, G. Cottura, D. Crespo, D. Denegri, M.L. Ducommun, C. Faner M. E. Figueroa, R. Franco, F. Giovannini, P. Goenaga, V. Lomello, M. Lloveras, Millares, P.S. Odetto, D. Panichelli, J. Pietrantonio, M. Rodríguez F., R. Suárez, N. Spiner y G. Zielinsky. (2012). *Buenas Prácticas Pecuarias (BPP) para la producción y comercialización porcina familiar*. Ministerio de Agricultura, Ganadería y Pesca, Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación, FAO, Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria INTA,. ISBN 978-92-5-306794-7. 275 pp.
- Blanco D, J. Suárez, J. Jiménez, F. González, L. M. Álvarez, Evelyn Cabeza y J. Verde. (2015). Eficiencia del tratamiento de residuales porcinos en digestores de laguna tapada. *Pastos y Forrajes*, Vol. 38, No. 4, octubre-diciembre, 441-447, 2015 / D. Blanc *Pastos y Forrajes*, Vol. 38, No. 4, octubre-diciembre, 441-447
- Bollo, Enzo. (2001). *Lombricultura una alternativa de reciclaje*. Soboc Grafic, Quito, Ecuador. 2ª. Edic., marzo 2001. ISBN-9978-40-812-6. 149 pp.
- Borlée, F., Yzermans, C. J., van Dijk, C. E., Heederik, D., Smit, L. A. M. (2015). Increased respiratory symptoms in COPD patients living in the vicinity of livestock farms. *The European Respiratory Journal*, 46, 1605-1614.
- Campos Solano, G. y G. Guzmán Díaz. (2014). *Producción de abono orgánico en pequeña escala con lombriz californiana (Eisenia foetida)*. San José, C.R. : MAG/FITTACORI. 48 p. Agencia de Servicios Agropecuarios Vázquez de Coronado, Sistema Unificado de Información Institucional. Fundación para el fomento y promoción de la investigación y transferencia de tecnología agropecuaria de Costa Rica ISBN 978-9968-877-67-1.
- Capassi, C. M., Costa, J. C., Cantil, M. E. S., Navarro, R. S., Romera, Y. F., Subtil, E. L., Chagas, R. K. (2013) Dimensionamento de un reactor UASB para o Tratamento de Águas Residuárias De Suinocultura Sizing of A UASB Reactor For The Treatment Of Swine Wastewater. *Revista de Saúde, Meio Ambiente e Sustentabilidade*. ISSN 1980-0894 Dossiê, Vol. 8, n. 2, 2013
- Capistrán Fabricio, Eduardo Aranda y Juan Carlos Romero (2001). *Manual de Reciclaje, Compostaje y Lombricompostaje*. Instituto de Ecología, A.C. 151 pp. 1era. Ed., 1era. Reimp. Xalapa, Ver. México. 80 a 138 pp. Bouchet, 1984.

- Cervantes Francisco J., Saldívar-Cabrales Jorge y Yescas José Francisco (2007). Estrategias para el aprovechamiento de desechos porcinos en la agricultura. *Revista Latinoamericana de Recursos Naturales*, 3 (1): 3-12, 2007
- Chao E. R., Sosas C.R. y Yasser Díaz C. Y. (2012). Gasto de agua de limpieza y tratamiento del residual en naves de ceba porcina. *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*, ISSN-1010-2760, Vol. 21, No. 3 (julio- septiembre, pp. 69-72)
- Cheng, D., Hao Ngo, H., Guo, W., Woong, S., Duc, D., Liu, Y., Wei, Q., Wei, D (2020). A critical review on antibiotics and hormones in swine wastewater: Water pollution problems and control approaches. *Journal of Hazardous Materials*, 387, 121682. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2019.121682>
- CNA-IMTA, (1994). Manual de diseño de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento, Libro II. Proyecto, 3a. Sección, Potabilización y Tratamiento, Tema Tratamiento, Subtema: Lagunas de Estabilización. Registro ISBN: 968-7417-00-5
- CONAGUA (2015) Manual de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento. Diseño de Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales Municipales: Reactores Anaerobios de Flujo Ascendente
- CONAGUA (2015). Manual de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento Operación y Mantenimiento de Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales Municipales: Lagunas de Estabilización
- CONAGUA (2021). Ley Federal de Derechos. Disposiciones Aplicables en Materia de Aguas Nacionales. Ley Federal de Derechos 2021 | Comisión Nacional del Agua | Gobierno | gob.mx (www.gob.mx)
- Conanp.,(2010). Disponible en: <https://www.gob.mx/conanp/acciones-y-programas/areas-naturales-protegidas-decretadas>
- Connor, M. (2001). *Sows on Straw: Meeting the Challenges*. Paper and Presentation for Pigs on Straw Conference sponsored by MB. Agr-Food. Anola & Brandon. Disponible en: www.gov.mb.ca/agriculture/livestock/pork/swine/pdf/bab14s02.pdf.-Oliveira 2001.
- Cornell (2021). *40 CFR Parte 257. Criteria for Classification of Solid Waste Disposal Facilities and Practices*. U.S. Law. LII/Legal Information Institute-Cornell University. <https://www.law.cornell.edu/search/searchResultsForm.html>.
- Dalla C. O. y C. Monticelli. (1999). Por dentro do Siscal. *Revista Suinocultura Industrial*. Número 37. Fev –Mar pp 32-35.
- Dalla C.O. (1998). *Sistema intensivo de suínos criados ao ar livre-SISAL: índice de produtividade. Custo de implantacao –EMBRAPA- CNPSA*. In: primer encuentro de técnicos del Cono Sur Especialistas en Sistemas Intensivos de Producción Porcina a Campo. Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA) Marcos Juárez. Argentina. Pp 5-25.

- De Lemos Chernicharo, Carlos Augusto (2007). *Anaerobic biodigestors*. Vol 4. IWA Publishing, London. ISBN: 1 84339 164 3. <https://www.iwapublishing.com/sites/default/files/ebooks/9781780402734.pdf>
- Delgado, C., Bautista, F., Ihl, T., Palma-López, D. (2017). Evaluación de la aptitud de tierras para la agricultura de temporal usando la duración del periodo de lluvia en el estado de Yucatán. *Ecosistemas y Recursos Agropecuarios*, 4, 485-497.
- Delgado, C., Bautista, F., Orellana-Lanza, R., Reyes Hernández, H. (2011). Clasificación andagrocimatic zoning using the relationship between precipitation and evapotranspiration in the state of Yucatán, México. *Investigaciones Geográficas*, 75,51-60. Disponible en http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0188-46112011000200005
- Delgado, C., Pacheco, A.J., Cabrera, A., Batllori, E., Orellana, R., Bautista, F. (2010). Quality of groundwater for irrigation in tropical karst environment: The case of Yucatán, Mexico. *Agricultural Water Management*, 97, 1423-1433.
- Diario Oficial del Estado de Yucatán, (2013), Decreto número 117. Decreto que establece el Área Natural Protegida denominada Reserva Estatal Geohidrológica del Anillo de Cenotes, disponible en: <https://whc.unesco.org/en/tentativelists/5784/>.
- Domínguez-Araujo, G., Galindo-Barboza, A., Salazar-Gutiérrez, G., Barrera-Camacho, G., y Sánchez-García, F., (2014). *Las excretas porcinas como materia prima para procesos de reciclaje utilizados en actividades agropecuarias*, INIFAP, Folleto Técnico Núm. 6, Campo Experimental Centro-Altos de Jalisco, Tepatitlán de Morelos.
- Drucker, A., Semerena, R., González, V., Magaña, S. (2004). La industria porcina en Yucatán: Un análisis de la generación de aguas residuales. *Problemas Del Desarrollo*, 34(135), 105-124. Retrieved January 6, 2021, from <http://www.jstor.org/stable/43839065>
- Environmental Protection Agency. (1986). *Land Application of Municipal Sludge*. EPA-625/1-83-016. Cincinnati, OH., A-1 pp.
- Environmental Protection Agency. (1988). *Guidance for Writing Case-by Case Permit Requirements for Municipal Sewage Sludge*. DRAFT. USEPA, Washington, September 30, 41, 36, 74 y 118 pp.
- Escalante Estrada Violeta E. Sánchez Guerrero Maribel, Pozo Román Fernando, Rivas Hernández Armando. (2000). *Identificación y evaluación de procesos biológicos de tratamiento*. IMTA. ISBN 968-7417-75-7.
- Escalante-Estrada V.E. y M.A. Garzón-Zúñiga (2011). Opciones de tratamiento para aguas residuales de tres granjas porcícolas. *Ingeniería Agrícola y Biosistemas* 2(2): pp. 87-90.
- Escalante-Estrada Violeta E.; Garzón-Zúñiga Marco A. y Valle-Cervantes Sergio (2012). Remoción de macronutrientes en el tratamiento de aguas

residuales porcícolas. Ra Ximhai, septiembre-diciembre, año/Vol. 8, Número 3 Universidad Autónoma Indígena de México Mochicahui, El Fuerte, Sinaloa. pp. 75-82

- Escalante-Estrada V.E., Garzón-Zúñiga M.A, y Valle-Cervantes S. (2014). Variabilidad en las características de las aguas residuales porcinas. *Revista Mitigación del Daño Ambiental Agroalimentario y Forestal de México*. Vol. 1, Núm. 112 de noviembre de 2014, p. 310. ISSN: 2395-9142 (resumen de artículo).
- Escalante-Estrada V.E., Garzón-Zúñiga M.A, Valle-Cervantes S. y Páez-Lerma J.B. (2016). Pretratamiento de un Agua Residual Porcina. *Revista Mitigación del Daño Ambiental Agroalimentario y Forestal de México*. Vol. 2, Núm. 2 15 de noviembre de 2016, p. 13-23. ISSN: 2395-9150.
- Escalante-Estrada, V.E., Garzón-Zúñiga, M.A., Valle-Cervantes, S. Paéz J. (2019). Swine Wastewater Treatment for Small Farms by a New Anaerobic-Aerobic Biofiltration Technology. *Water Air Soil Pollut* 230, 145 (2019). <https://doi.org/10.1007/s11270-019-4200-3>
- Estrada V. E. E.; Hernández D. E. A. (2002). Treatment of piggery wastes in waste stabilization ponds. *Water Science and Technology*. Vol. 45 Núm. 1 pp 55-60. IWA Publishing.
- Euiso Choi, Daehoon Kim, Youngjin Eum, Zuwhan Yun, Kyong-Sok Min (2005) Full- scale Experience for Nitrogen Removal From Piggery Waste. *Water Environ Res*. Jul-Aug(2005);77(4):381-9. doi: 10.2175/106143005x51969
- FAO. Román Pilar, María M. Martínez, Alberto Pantoja. (2013). *Manual de compostaje del agricultor, Experiencias en América Latina*. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. Oficina Regional para América Latina y el Caribe. Santiago de Chile, 2013. ISBN 978-92-5-307844-8 (edición impresa). E-ISBN 978-92-5-307845-5 (PDF).
- Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO)(2017). "New food balances", disponible en: <http://www.fao.org/faostat/en/#data/FBS>
- Garzón-Zúñiga M.A., Lessard P., Aubry G. y Buelna G. (2007). Aeration effect on the efficiency of swine manure treatment in a trickling filter packed with organic materials. *Wat. Sci. Tech.*, 55(10), 135-143
- Garzón-Zúñiga M.A. y G. Buelna (2014). Caracterización de aguas residuales porcinas y su tratamiento por diferentes procesos en México. *Rev. Int. Contam. Ambie.* 30 (1) 65-79.
- Giácoman-Vallejos, Germán; Yáñez-Palma, Rosimary; Ponce-Caballero, Carmen Méndez-Novelo, Roger Iván; Quintal-Franco, Carlos Alberto (2017). *Diagnóstico de la operación de digestores anaerobios para el tratamiento de aguas residuales porcícolas en granjas del Estado De Yucatán*. Memorias del Tercer Congreso Nacional AMICA. Facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma de Yucatán., Villahermosa, Tabasco.

- GeoComunes y Consejo Civil Mexicano para la Silvicultura Sostenible, A.C., (2019). *Geovisualizador de la península de Yucatán. Granjas porcinas y avícolas*, disponible en: <http://geocomunes.org/Visualizadores/PeninsulaYucatan/>
- Gobierno del Estado de México, Secretaría del Medio Ambiente., (2008). *Inventario de emisiones de gases de efecto invernadero y vulnerabilidad del Estado de México ante el cambio climático global*, disponible en: http://sma.edomex.gob.mx/sites/sma.edomex.gob.mx/files/files/sma_pdf_base_diag_cam_cli.pdf
- Goenaga, P. (2002). Cría intensiva de cerdos a campo: *Ventajas y desventajas*. Material de difusión. Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA) Marcos Juárez. Argentina. (On line): http://www.inta.gov.ar/pergamino/investiga/grupos/porcinos/cria_intensiva_ventydesv.htm [25/09/2004].
- Graves R. E., G.M. Hattemer, and D. Stettler. (2010). Chapter 2 Composting. In: *Environmental Engineering*. National Engineering Handbook. United States Department of Agriculture Natural Resources Conservation Service Part 637. (210-VI-NEH, Amend 40, 2010).
- Greenpeace., (2020). *¿Qué hay detrás de la industria porcícola en la península de Yucatán? La carne que está consumiendo al planeta*. Disponible en: https://www.greenpeace.org/static/planet4-mexico-stateless/2020/05/188dc911-reporte_granjas_webok3.pdf
- Gray, K.R., and K. Sherman, (1970). *Public Cleansing* 60(7):343-354.
- Gray, K.R., K. Sherman, and A.J. Biddlestone.(1993) *Process Biochemistry* 6(10):22-28. Haug, R.T. *Practical Handbook of Compost Eng'g*. Lewis Publishers, Boca Raton, FL. p.411
- Hernández A., Ramírez E., Garzón-Zúñiga M.A. (2011) Desempeño de un biofiltro sin aire acoplado con uno aireado para tratar aguas residuales porcícolas. *Revista AIDIS ARGENTINA, Ingeniería Sanitaria y Ambiental*, No 112, 44-49
- Hill, J. (2000). *Deep bed swine finishing*. 5o Seminario Internacional de Suinocultura. Expo Center Norte, Sao Paulo, Brasil. 83-88 p. (On line). <http://www.fao.org/WAICENT/FAOINFO/AGRICULT/AGA/AGAP/FRG/MULBERRY/Papers/PDF/Mulbwar2.pdf> [12/09/2004].
- INECC., (2018). *Inventario nacional de emisiones de gases y compuestos de efecto invernadero*, disponible en: <https://www.gob.mx/inecc/acciones-y-programas/inventario-nacional-de-emisiones-de-gases-y-compuestos-de-efecto-invernadero> (2019), Portal de Indicadores de eficiencia energética y emisiones vehiculares, disponible en: <http://www.ecovehiculos.gob.mx/>
- Jay-Myoung R.,Byoung_Ug K. and Jae-Hynk K. (2004). Attachment Characteristics of Biofilms in FixedLock Media for Swine Wastewater Treatment. *Journal of Environmental Science and Health*. Vol. A39, No. 7, p 1843 – 1852. Marcel Dekker, Inc.

- Jianbin Guo, Renjie Dong, Joachim Clemens, Wei Wang (2013). Performance evaluation of a completely stirred anaerobic reactor treating pig manure at a low range of mesophilic conditions. *Waste Management* 33 (2013) 2219–2224.
- Loftus, C., Yost, M., Sampson, P., Torres, E., Arias, G., Breckwich, V., Hartin, K., Armstrong, J., Tchong-French, M., Vedal, S., Bhatti, P., Karr, C. (2015). Ambient ammonia exposures in an agricultural community and pediatric asthma morbidity. *Epidemiology*, 26, 794–801. <https://doi.org/10.1097/EDE.0000000000000368>
- Karakashev D., Schmidt J.E., Agelidaki I. (2008). Innovative process scheme for removal of organic matter, phosphorus and nitrogen from pig manure. *Water Research* 42, 4083-4090. www.elsevier.com/locate/watres.
- Kvolec Claudio (2019). Granjas porcinas, estiércol y medioambiente. granjas porcinas, estiércol y medioambiente (elproductorporcino.com), FECHA DE CONSULTA 25/05/2021
- Leeds R., L.C. Brown, M. R. Sule and L. VanLieshout. (1994). *Vegetative Filter Strips: Application, Installation and Maintenance*. Ohio State University Extension. AX-467-94.
- Lester, N. (1987)a. Heavy metals in wastewater and sludge treatment process. Vol. I. Sources Analysis and legislation. CRC Press, Florida.
- Loftu , C., Yost, M., Sampson, P., Torres, E., Arias, G., Breckwich, V., Hartin, K., Armstrong, J., Tchong-French, M., Vedal, S., Bhatti, P., Karr, C. (2015). Ambient ammonia exposures in an agricultural community and pediatric asthma morbidity. *Epidemiology*, 26, 794–801. <https://doi.org/10.1097/EDE.0000000000000368>
- Maisonnave Roberto, Patricia Millares y Karina Lamelas. (2016). *Buenas Prácticas de Manejo y Utilización de Efluentes Porcinos*. Secretaría de agricultura, ganadería y pesca. Subsecretaría de Ganadería. Dirección Nacional de Producción Ganadera. Gobierno de Argentina. 53 páginas. (Natural Resources Conservation Service, 2008).
- Martí Herrero J, (2019). *Digestores tubulares: Guía de Diseño y Manual de Instalación*. Resbiolac. Ecuador. ISBN: 978-9942-36-276-6.
- Méndez-Novelo, R., E. Castillo-Borges, E. Vázquez- Borges, O. Briceño-Pérez, V. Coronado-Peraza, R. Pat-Canul, P. Garrido-Vivas (2009), Estimación del potencial contaminante de las granjas porcinas y avícolas del estado de Yucatán, *Ingeniería*, 13(2)13-21.
- Méndez Novelo, Roger; Mena Velázquez, Rubí; Castillo Borges, Elba René; Sauri Riancho, María Rosa (2013). Evaluación de un reactor UASB para aguas porcinas inoculado con líquido ruminal. *Ingeniería*, vol. 17, núm. 1, enero-abril, 2013, pp. 41-55 Universidad Autónoma de Yucatán Mérida, México
- Moncayo Romero, Gabriel (2020). *Digestores. Manual práctico de diseño*. Aqualimpia Engineering e.K. ISBN: 978-9942-01-719-2. 451p.

- Montero, E.M. (2015). *Características de la producción porcina*. En: Alternativas a la producción porcina a pequeña escala. Martínez R. y Herradora M.A (Eds). Universidad Nacional Autónoma de México. pp 17-33.
- Na Duan, Duojiao Zhang, Cong Lin, Yifeng Zhang, Lingying Zhao, Hongbin Liu, Zhidan Liu (2019). Effect of organic loading rate on anaerobic digestion of pig manure: Methane production, mass flow, reactor scale and heating scenarios. *Journal of Environmental Management* 231 (2019) 646–652. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2018.10.062>
- Natural Resources Conservation Services (2008). *Filter Strip Conservation Practice Standard*. Oklahoma State University – Cooperative Extension Service. Fact Sheet F1735.
- Norma Mexicana NMX-AA-3-SCFI-1980. *Aguas residuales.- Muestreo*. Secretaría de Comercio y Fomento Industrial. Dirección General de Normas. Diario Oficial de la Federación, México. 1980
- 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*. Diario Oficial de la Federación. 6 de enero de 1997.
- Norma Oficial Mexicana NOM-004-SEMARNAT-2002, *Protección ambiental.- Lodos y biosólidos.-especificaciones y límites máximos permisibles de contaminante para su aprovechamiento y disposición final*: Diario Oficial de la Federación. 15 de Agosto de 2003.
- OCDE (2019), “*Exámenes de mercado en México: estudio de caso del mercado de la carne de cerdo*”, disponible en: <https://www.oecd.org/daf/competition/market-examinations-mexico-pork-meat-market-webesp.pdf>.
- Oliveira, P.; Nunes, M. y Arriada, A. (2001). *Compostagem e utilização de cama nasuicultura. Anais: Simpósio Sobre Manejo e Nutrição de Aves e Suínos e Tecnologiada Produção de Rações* (1.,2001: Campinas,SP). Colégio Brasileiro de Nutrição Animal, CBNA, Campinas SP, novembro de 2001, 391-406.
- Pacheco J., Cabrera, A., Steinich, B., Frías, J., Coronado, V., y Vázquez, J., (2002) Efecto de la aplicación agrícola de la excreta porcina en la calidad del agua subterránea. *Ingeniería*, 6(3):7-17.
- Pérez Espejo Rosario (2001). *Porcicultura y Contaminación del agua en La Piedad, Michoacán, México*. Rev. Int. Contam. Ambient. 17 (1) 5-13, 2001. UNAM.
- Pérez Espejo Rosario. (2006). *Granjas Porcinas y Medio Ambiente, Contaminación del Agua en la Piedad Michoacán*. Editorial Plaza Valdez, Coeditor: SEMARNAT/Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, UNAM/Universidad Nacional Autónoma de México. México. ISBN 9707225181. EAN-13 9789707225183. Libro Pp 204, páginas consultadas 99-146.

- Pérez-Espejo Rosario. (2002). *El costo ambiental en las granjas porcinas de La Piedad, Michoacán*. UNAM. <https://xdoc.mx/documents/el-costo-ambiental-en-las-granjas-porcinas-de-la-piedad-michoacan-5e7bc1c09bacl>.
- Radon, K., Schulze, A., Ehrenstein, V., van Strien, R. T., Praml, G., Nowak, D. (2007). Environmental exposure to confined animal feeding operations and respiratory health of neighboring residents. *Epidemiology*, 18, 300–308. <https://doi.org/10.1097/01.ede.0000259966>.
- Ramírez Hernández Gerardo (2015). Capítulo 8 “Alternativas para el cuidado de la salud animal y del ambiente para granjas en pequeña escala” del libro de *Alternativas para la producción porcina a pequeña escala*. UNAM- ISBN: 978-607-02-6915-8
- Ramonet, Y., Meunier-Salaun, M. y Dourmand, J. (1999). High-fiber diets in pregnant sows: digestive utilisation and effects on the behavior of the animals. *Journal of Animal. Science*. 77:591-599.
- Román Pilar, María M. Martínez, Alberto Pantoja. (2013). *Manual de compostaje del agricultor, Experiencias en América Latina*. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. Oficina Regional para América Latina y el Caribe. Santiago de Chile, 2013. ISBN 978-92-5-307844-8 (edición impresa). E-ISBN 978-92-5-307845-5 (PDF).
- Repda (2019), disponible en: <https://app.conagua.gob.mx/consultarepda.aspx>
- RMGIR (2015), *Unidades de producción porcina, en el mapa de la Red Mesoamericana para la Gestión Integral de Riesgos*. Elaborado por el Centro Nacional para la prevención de Desastres (Cenapred) de México, disponible en: <http://rmgir.proyectomesoamerica.org/index.php>
- Roppa, L. (2000). Deep Bedding. *Revista Suinicultura Industrial*. Número 143- Feb/Mar/2000.
- Rodríguez F., R. Suárez, N. Spiner y G. Zielinsky. (2012). *Buenas Prácticas Pecuarias (BPP) para la producción y comercialización porcina familiar*. Ministerio de Agricultura, Ganadería y Pesca, Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación, FAO, Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria INTA,. ISBN 978-92-5-306794-7. 275 pp.
- SAGARPA, FIRCO (2013). Especificaciones técnicas para digestores pequeños tipo laguna cubierta. 55p. <https://docplayer.es/14388407>.
- Santos, R. y Sarmiento, L. (2005). Producción de cerdos en exterior en el trópico. *En: VIII Encuentro de Nutrición y Producción de Animales Monogástricos*. Conferencias. Memorias. 20-28:2005. Disponible en: <http://www.sian.info.ve/> porcinos.
- Sarmiento P.A., A.C. Borges, A.T. Mateos (2012). Evaluation of Vertical-Flow Constructed Wetland for Swine Wastewater Treatment. *Water Air Soil Polluted* (2012) 223:1065-1071. DOI 10.1007/s11270-011-0924-4.

- Schuldt, Miguel. (1999). *Lombricultura fácil*. Work Graf, S.R.L. Buenos Aires, Argentina. 2004. ISBN 987-43-7070-X. Bollo, (1999).
- Secretaría de Salud. (2018). *Boletín Epidemiológico del Sistema Nacional de Vigilancia Epidemiológica*, vol. 35, no. 46, semana 46. Recuperado de: <https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/415172/sem46.pdf>
- Segura Castruita M, P. Sánchez Guzmán, C. Ortiz Solorio, M. Gutiérrez-Castorena (2005), "Carbono orgánico de los suelos de México", *Terra Latinoamericana*, 23,(1), enero-marzo
- Semarnat, (2017), Registro de Emisiones y Transferencia de Contaminantes (RETC), disponible en: <http://sinat.semarnat.gob.mx/retc/index.html>
- Semarnat, (2019), Gaceta Ecológica. *Manifestaciones de Impacto Ambiental*, disponible en: <https://www.semarnat.gob.mx/gobmx/transparencia/impacto.html>
- SEMARNAT, SAGARPA, FIRCO (2010). *Especificaciones técnicas para el diseño y construcción de digestores en México*. 52p. <https://biblioteca.semarnat.gob.mx/janium/Documentos/Ciga/libros2009/CD001057.pdf>
- SIAP (2017), *Unidades de Producción Pecuaria, en el mapa "Infraestructura del Sector Agroalimentario"* del Sistema de Información Agroalimentaria y Pesquera, disponibles en: <https://www.gob.mx/siap/acciones-y-programas/informacion-geoespacial-32571>.
- Smit, L. A. M., Heederik, D. (2017). Impacts of intensive livestock production on human health in densely populated regions. *GeoHealth*, 1, 272–277, <https://doi.org/10.1002/2017GH000103>.
- Sosa Cáceres R., Chao R, Cruz E. y M. Diana. (2007). *Biodigestores en el tratamiento de excretas porcinas. Biodigestores como componentes de sistemas agropecuarios integrados*. Instituto de Investigaciones Porcinas. Boletín Técnico, Número 5, mayo 2007.
- Sosa R. y R. (2005). Chao construcción de biodigestores y está basada en la experiencia. *Biodigestores y agricultura sostenible acumulada no solo en Cuba sino también en el extranjero*. ACPA, Año 24 No. 1 (2005). p. 23-24.
- Taiganides, E. P., Pérez R., Girón E. (1996). *Manual para el manejo y control de aguas residuales y excretas porcinas en México*. Instituto de Investigaciones Económicas, UNAM, México. Consejo Mexicano de Porcicultura. ISBN 968-7795-00-X. Colección FAO. 147 p.
- Tchobanoglous, G., (2002). *Handbook of Solid Waste Management*, 2nd ed. The McGraw-Hill Companies, Inc. New York, US.
- Techio, V. H., Stolberg, J., Kunz, A. Zanin, E., and Perdomo†, C.C. (2011). *Genotoxicity of swine effluents*. *Water Science & Technology* 63(5), 970-975.

- Trejo Lizama, W., Vázquez González, L. B., J Uicab, A., Castillo Caamal, J., Caamal Maldonado, A., Belmar Casso, R., Santos Ricalde, R. (2014) Eficiencia de remoción de materia orgánica de aguas residuales porcinas con biodigestores en el Estado de Yucatán, México. *Tropical and Subtropical Agroecosystems* [en línea]. 2014, 17(2), 321-323 [fecha de Consulta 29 de Mayo de 2021]. ISSN: Disponible en: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=93931761025>
- Torres Cedillo, L. (2000). Elaboración de composta. Sistema de agro negocios de traspatio. Departamento de Suelos UACH. SAGARPA.
- Urbina Bravo Alejandra y Avendaño Mena Johanna (2010) *Manual para el productor tecnologías sostenibles para el manejo de remanentes en granjas porcinas*. Programa de investigación y transferencia tecnológica en cerdos. Fundación swisscontac. Ministerio de agricultura y ganadería servicio nacional de salud animal. Costa Rica.
- U.S..Environmental Protection Agency. (1995). *A guide to Biosolid Risk Assesment for the EPA Part 503 Rule*. URL: <http://www.epa.gov/owm/mtb/biosolids/503rule>.
- United States Environmental Protection Agency (EPA). (1992). *Environmental Regulations and Technology, Control of Pathogens and Vector Attraction in Sewage Sludge*. EPA/625/R-92/013, Revised July 2003.
- Universo Porcino. (2013). *El impacto Ambiental en los Distintos Sistemas de Producción*. Biblioteca Digital de la Universidad Católica de Argentina. Portal digital: www.universoporcino.com. Fecha publicación: 23 octubre 2013.
- Vadell, A. (1999). *Producción de cerdos a campo*. V Encuentro sobre nutrición u producción de animales monogástricos. Facultad de Agronomía, Universidad Central de Venezuela. Maracay, Venezuela. 119p.
- Vadell, A.; Barlocco, N. (1995). *Paridera*. Tipo Rocha. Serie "Producción Porcina" N°1. Fac. de Agronomía – PROBIDES. Montevideo, Uruguay. 8p.
- Vadell, A.; Barlocco, N.; Garín, D. (2003). *Caracterización de los principales componentes de los sistemas de producción de cerdos a campo en Uruguay*. En: III Encuentro Latinoamericano de Especialistas en Sistemas de Producción Porcina a Campo. Córdoba, Argentina.
- Victorica-Almeida J.L., Galván-García M. and Ayala-Ruiz R. (2008). Sustainable Management of Effluents from Small Piggery Farms in Mexico. *American Journal of Environmental Sciences* 4 (3); 185-188. ISSN 1553-345X.
- Von Sperling, Marcos and Carlos Augusto de Lemos Chernicharo (2005). *Biological Wastewater Treatment in Warm Climate Regions*. Vol 1. IWA Publishing, London. ISBN: 1 84339 002 7. <https://www.iwapublishing.com/sites/default/files/ebooks/9781780402734.pdf>
- WEF, WERF and EPA (2012). *Solids Process Design and Managment*. MacGraw Hill. ISBN-978-07-178095-7.

Wheaton, Howell y John C. Rea. (1993). *Forages for swine*. University of Missouri-Columbia. (On line): <http://muextension.missouri.edu/xplor/agguides/ansci/index.htm>.

Wing, S., Avery, R., Marshall, S.W., Thu, K., Tajik, M., Schinasi, L., Schiffman, S. S. (2008). Air Pollution and Odor in Communities Near Industrial Swine Operations. *Environmental Health Perspectives*. 116, 362–1368. doi: 10.128



MEDIO AMBIENTE

SECRETARÍA DE MEDIO AMBIENTE Y RECURSOS NATURALES



IMTA

INSTITUTO MEXICANO
DE TECNOLOGÍA DEL AGUA