

Persistencia de microorganismos patógenos en biosólidos porcinos provenientes de reactores anaerobios

María Teresa Medrano Ramírez,¹ Francisco Rivera Benítez,² Jesús A. Guevara Guevara,¹ Román Espinosa Cervantes¹ y Adelfa del Carmen García Contreras^{1*}

Resumen. La digestión anaerobia es un proceso de biorreacción que permite convertir residuos orgánicos, generados en unidades de producción porcina (UPP's), en energía (biogas), biosólidos y biofertilizantes gracias a la acción de microorganismos que actúan durante la ausencia de oxígeno. Sin embargo, se han realizado investigaciones en donde se da a conocer la presencia de microorganismos patógenos (bacterias, virus, levaduras y hongos) que resisten a dichos procesos de fermentación y que pueden ser diseminados en suelos agrícolas y en el agua, ya que no cuentan con especificación sanitaria o incumplen la normatividad vigente, por lo que se podría generar un impacto en los suelos, así como el agua y el aire, y con ello poner en riesgo a los seres vivos.

La presente revisión de la literatura muestra la presencia y persistencia de ciertos microorganismos patógenos (bacterias y virus) en subproductos, generados a partir de la biodigestión anaeróbica, aun cuando se sugiere su uso para transformar los residuos orgánicos generados en las UPP, también se observan deficiencias en las políticas públicas con relación a la gestión medioambiental y la gestión de residuos orgánicos.

Palabras clave: Biosólidos, Excretas porcinas, Microbiología, Fermentación anaerobia.

Abstract. Anaerobic digestion is a bioreaction process that converts organic waste generated in swine production units (UPPs) into energy (biogas), biosolids and biofertilizers thanks to the action of microorganisms in the absence of oxygen. However, several works have shown the presence of pathogenic microorganisms (bacteria, viruses, yeasts and fungi), which resist these fermenta-

¹ Departamento de Producción Agrícola y Animal. Universidad Autónoma Metropolitana-Xochimilco. CDMX.

² Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias. CDMX.

* Autora de contacto, e-mail: adelfa@correo.xoc.uam.mx.

tion processes and can be disseminated in agricultural soils, water. Apart from non-compliance of current regulations, they can put human and animal health at risk due to their presence in water and air, which would.

The present literature review shows that even under anaerobic fermentation processes, pathogenic microorganisms persist and can be considered a biological hazard for animal, plant and human health depending on the concentration of particles.

Key words: Biosolids, Swine faeces, Anaerobic fermentation.

INTRODUCCIÓN

La intensificación de la porcicultura ha ocasionado un aumento en la producción de excretas, las cuales no son tratadas adecuadamente y se vierten sobre los suelos sin considerar que pueden contener exceso de nutrientes, como fósforo, nitratos, nitritos, ortofostatos y amoníaco, los cuales, por lixiviación y eutrofización, se filtran a los mantos freáticos. Adicional, al impacto ambiental negativo debido a la emisión de gases de efecto invernadero (dióxido de carbono, óxido nitroso, metano, entre otros) (De Alba, 2019).

La gestión de los residuos orgánicos de origen ganadero se ha convertido en un grave problema debido, básicamente, a la separación progresiva de la explotación ganadera y la agrícola, ya que la mayoría de las Unidades de Producción Porcina (UPP) no poseen una base territorial suficiente para gestionar y, en el mejor de los casos, reutilizar los residuos ganaderos (Bragachini *et al.*, 2016). Esto, aunado a la disminución y lejanía de la superficie agrícola útil y el aumento de la densidad animal en las UPP's, hace que el sector ganadero sea una de las industrias con mayor problemática de gestión de residuos (Negrin y Jiménez, 2012; De Alba, 2019).

Los residuos ganaderos contienen diversos patógenos que pueden dañar la salud humana, vegetal y animal, los más importantes son las bacterias, virus, hongos y levaduras, metales pesados y disruptores hormonales, que han resultado ser de difícil eliminación y control en las UPP's mediante el desarrollo de Buenas Prácticas Pecuarias (BPP), por lo que el uso de biotecnologías amigables con el ambiente son una excelente opción para mitigar el daño ocasionado, principalmente en el agua (Senasica, 2016).

De acuerdo con un estudio realizado por Manser *et al.* (2015), el uso de reactores anaeróbicos ha logrado una disminución significativa de patógenos, como *Salmonella* y *E. coli*, en una etapa mesofílica. Sin embargo, para el virus de la diarrea epidémica

porcina, la temperatura es el factor más importante para lograr su inactivación, por lo que puede variar desde los 20°C hasta los 71°C, dependiendo el tiempo de exposición (Thomas *et al.*, 2015).

Residuos orgánicos de la producción porcina

La contaminación ambiental, a causa de un mal manejo de los residuos orgánicos, ha ido en aumento, tal como se detalla en el informe sobre la caracterización y gestión de los residuos en América del Norte (2017). En este informe, se argumenta que México tiene una producción de residuos orgánicos de 35.8 millones de t/año, y sólo 2.5 de estos residuos orgánicos son reutilizados para algún fin. Sin embargo, en el mismo informe se destaca que son datos estimados, debido a la falta de información de sectores como el agropecuario. También se abordan los diversos tratamientos (digestión anaerobia, composta y lagunas) eficaces para la reutilización de los residuos en los tres países de América del Norte (Canadá, Estados Unidos y México), cada uno de los cuales juegan un papel importante en el desarrollo de políticas internacionales que sean efectivas y descriptivas para el adecuado manejo de los residuos orgánicos en la zona (CCA, 2017).

Dentro de la normatividad mexicana, se encuentra la Norma Oficial Mexicana, Protección Ambiental. Lodos y Biosólidos. Especificaciones y límites máximos permisibles de contaminantes para su aprovechamiento y disposición final al respecto del manejo y uso de los residuos (NOM-004-SEMARNAT-2002), la que tiene como objetivo regular los residuos provenientes del alcantarillado urbano o municipal que reciben aguas residuales. Es de esta norma de donde se obtiene la definición de los términos de “lodos” y “biosólido”, estos últimos considerados como residuos que pueden ser procesados para su estabilización y control (digestión aerobia, digestión anaerobia o estabilización alcalina), evitando con ello una posible contaminación, y posibilitando su uso como mejoradores o acondicionadores de suelos dado su contenido de materiales orgánicos y nutrientes. Por otra parte, el método convencional de disposición final de los lodos es el relleno sanitario, lo cual provoca riesgos ambientales, debido a procesos de eutrofización por el exceso de nutrientes, como nitratos, metales pesados y compuestos orgánicos, los cuales pueden llegar a los mantos acuíferos (Potisek-Talavera *et al.*, 2010).

Los biosólidos, que son utilizados como mejoradores de suelos con fines agrícolas y forestales, se encuentran en el nivel C (Cuadro 1) de la clasificación realizada en la NOM-004-SEMARNAT-2002, en donde se establecen los límites máximos que no deben excederse de contenido mineral, microbiológico y parasitario, con la finalidad de prote-

ger el medio ambiente y la salud agrícola, humana y pecuaria, sin embargo, en la norma no se hace referencia a los residuos orgánicos generados por las actividades pecuarias y los límites máximos permisibles que deben cumplir.

Cuadro 1. Clasificación de biosólidos y límites máximos permisibles de contaminantes

Clasificación de biosólidos*					
Clase A: Para usos urbanos con contacto público directo durante su aplicación					
Clase B: Para usos urbanos sin contacto público directo durante su aplicación					
Clase C: Aprovechamiento como mejoradores de suelos, fines agrícolas y/o forestales					
Límites máximos de contaminantes en los biosólidos Clase C					
Metales pesados (mg/kg base seca)		Coliformes fecales (NMP/g base seca)	<i>Salmonella</i> spp. (NMP/g base seca)	Huevos de helminto/g en base seca	
Arsénico	41-75	Menor a 2,000,000	Menor de 300	Menor de 35	
Cadmio	39-85				
Cromo	1200-3000				
Cobre	1500-4300				
Plomo	300-840				
Mercurio	17-57				
Níquel	420				
Zinc	2800-7500				

NMP=Número Más Probable.

*Fuente: NOM-004-SEMARNAT-2002.

En el año 2019, en el estado de Jalisco se produjeron 3,719,870 cerdos, de acuerdo al último informe del Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP, 2019), por lo que la cantidad de los residuos orgánicos producidos en las UPP's (excretas, purines, lodos, aguas residuales, placenta, ombligos, orines y restos de alimento), lo que obligó a productores y autoridades a desarrollar y publicar una Norma Estatal, la cual detalló el tipo de tratamiento que debía emplearse para el manejo de los residuos orgánicos porcinos, asumiendo que la densidad animal es un factor fundamental, así como la disposición final de los subproductos generados de estos procesos (NAE-SEMADES-003/2004). También existe una norma estatal (NAE-SEMADES-004/2004), en la que se establece el proceso por el cual se debe realizar la inhumación de los cadáveres porcinos, cuya muerte no haya sido causada por enfermedades infectocontagiosas y/o parasitarias.

Por su parte, en la normativa nacional concerniente a las aguas residuales (NOM-001-ECOL-1996), se detallan no sólo los sistemas para reutilizarlas, sino también los límites máximos permisibles de contaminantes para evitar que, al verterla a los cuerpos de agua y bienes nacionales, no se produzca daño ecológico, reduciendo con ello la diseminación de microorganismos patógenos que ponen en riesgo a los individuos que tienen contacto con ellas además del suelo, agua y productos alimenticios contaminados.

En el Manual de Buenas Prácticas Pecuarias en Granjas Porcinas (MBPP) (Senasica, 2016) se denominan como desechos a los animales muertos, sacrificados, fetos, placentas, excretas, purines, entre otros, lo cual debería ser sustituido por el término de residuo, el cual está contemplado en la Ley General de Prevención y Gestión Integral de Residuos. Esto no es un asunto menor, ya que el término desecho no implica un sistema de reciclamiento que, según sea el caso, puede llegar a ser la base de un sistema de composteo, evitando así que los cadáveres sean potencialmente contaminantes ambientales y reservorios de enfermedades.

Los productos generados en las granjas porcinas corresponden a residuos que deben recibir un manejo especial (Figura 1), ya que incluyen excretas, orina, agua de bebida, alimento, tejidos, aguas de consumo y de primer contacto, entre otros residuos de tipo orgánico (Guevara *et al.*, 2012). Todos estos residuos orgánicos, en algunas granjas, son conducidos a sistemas de almacenamiento o contención (lagunas, fosas sépticas o reactores anaeróbicos) (Senasica, 2016), aunque esto no es obligatorio, por lo que sólo se pone atención en el manejo de las aguas residuales (MBPP).

La Encuesta Nacional Agropecuaria (Inegi, 2019) arrojó que, para el año 2017, sólo 1.59% de los biosólidos (excretas y purines) se transformaron, siendo el compostaje uno de los mecanismos más utilizados, con el objetivo de proteger el medio ambiente. Además, en la encuesta se reportan otras acciones importantes de apoyo a la gestión ambiental por parte de las UPP's, como el cuidado y uso eficiente del agua, el tratamiento de las excretas por reactores para la producción de biofertilizantes, así como el cuidado y restauración de suelos (Cuadro 2).

Figura 1. Clasificación de los residuos, según su origen y tipo

Residuo: Material o producto cuyo propietario o poseedor desecha y que se encuentra en estado sólido o semisólido, o es un líquido o gas contenido en recipientes o depósitos, y que puede ser susceptible de ser valorizado o requiere sujetarse a tratamiento o disposición final

Residuos de Manejo Especial: Son aquellos generados en los procesos productivos, que no reúnen las características para ser considerados como peligrosos o como residuos sólidos urbanos, o que son producidos por grandes generadores de residuos sólidos urbanos

Residuos Incompatibles: Aquellos que al entrar en contacto o al ser mezclados con agua u otros materiales o residuos, reaccionan produciendo calor, presión, fuego, partículas, gases o vapores dañinos

Residuos Peligrosos: Aquellos que posean alguna de las características de corrosividad, reactividad, explosividad, toxicidad, inflamabilidad, o que contengan agentes infecciosos que les confieran peligrosidad, así como envases, recipientes, embalajes y suelos que hayan sido contaminados cuando se

Residuos Sólidos Urbanos: Los generados en las casas habitación, que resultan de la eliminación de los materiales que utilizan en sus actividades domésticas, de los productos que consumen y de sus envases, embalajes o empaques

Adaptado: Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos, 2003.

Cuadro 2. Acciones para protección al medio ambiente a través del reúso de los residuos orgánicos, según la Unidad de Producción Pecuaria (UPP)

Acciones	Promedio nacional (%)
Disminución del consumo de agua	20.69
Tratamiento de excretas y aguas residuales	1.59
Producción de composta con residuos orgánicos	6.71
Aplicación de obras de conservación y restauración de suelos	8.11

Fuente: INEGI, 2019.

Producción de excretas porcinas

El alojamiento de animales con alta densidad, en pequeñas áreas de tierra, ha dado lugar a la generación, acumulación y eliminación de grandes cantidades de residuos (Ejarque *et al.*, 2019). Dentro de la UPP's, la producción de excretas ocupa la proporción más alta de residuos y que son causantes de enfermedades infecciosas, provenientes de los animales enfermos, aunque clínicamente se observen sanos. Además, las excretas producen malos olores debido a la emisión de gases, así como contaminación por antimicrobianos, nutrientes, material orgánico e inorgánico.

La producción de excretas en una UPP depende de diversos factores, como la edad y género: en hembras el requerimiento nutricional es variable dependiendo de la etapa fisiológica en la que se encuentren (lactancia, gestación o hembras de reemplazo), cantidad y tipo de alimento (seco o húmedo) que se les otorga, así como la calidad del mismo (digestibilidad) (Antezana, 2016), cantidad de agua ingerida, clima (tropical, seco, templado, polar), estado de salud, número de animales, entre otros (Campos, 2001; Senasica, 2016). Por ello, la producción calculada de residuos orgánicos en UPP varía. Vera-Romero *et al.* (2014) clasificaron, por edad y talla de los cerdos, los residuos producidos (excretas) en cantidad y calidad por día.

Considerando que la cantidad de excretas producida por animal depende del tipo de dieta y la digestibilidad de la misma, la Universidad Estatal de Oklahoma (OSU, 2015) dio a conocer la producción de excretas porcinas por etapa fisiológica y peso vivo

del animal (P.V), utilizando una dieta a base de maíz (Cuadro 3), asimismo, se observa la producción de sólidos volátiles y la relación de C:N.

Cuadro 3. Producción diaria de excretas porcinas utilizando una dieta a base de maíz.

Componente	Recría	Crecimiento (22.5 – 55.5 kg de P.V)	Finalización (56.5 – 80 kg de P.V)	Finalización (81 – 115 kg de P.V)	Hembras de reemplazo	Machos (verracos)	Hembras gestantes	Hembra + camada
Cantidad de excretas								
Peso (gr)	1.67	2.71	3.62	4.25	3.71	3.71	3.71	11.77
Volumen (m³)	.0015	.0026	0.0036	.0042	0.0036	0.0036	0.0036	.011
Sólidos totales (gr)	.167	.27	.362	.425	.371	.344	.339	1.177
Materia orgánica								
Sólidos volátiles (gr)	.140	.244	.326	.385	.330	.308	.294	1.041
DQO (gr)	.154	.27	.371	.434	.353	.249	.326	1.132
Relación C:N	8	7	7	7	7	6	6	7

DQO: Demanda Química de Oxígeno; Relación C:N: Relación Carbono: Nitrógeno; P.V.= Peso vivo
Adaptado: OSU, 2015.

Manejo y gestión de residuos orgánicos de UPP

El principal problema para la gestión de los residuos de las UPP's, no es tanto la cantidad total, sino la excesiva concentración en determinadas áreas, lo que supera la capacidad de aceptación del medio (Campos, 2001).

En el Art. 5 de la Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos (DOF 02-05-2015) se describe lo que es considerado como un residuo (Figura 1). Se incluyen a los orgánicos generados en la producción ganadera, en la clasificación de los "Residuos de Manejo Especial" (RME). INECC y Semarnat (2013) realizaron un estudio en México, en donde se calculó la producción de RME, entre los cuales están

las excretas, señalando que en seis años (2006-2012) se produjo una media de 66,708.27 t año⁻¹, de las cuales 18,547.36 ton año⁻¹ corresponden a los porcinos. Adicional, y derivado de la clasificación de los residuos (Fig.1), se caracterizó el lugar de generación de los mismos dentro de una UPP, por tanto, los RME se generan en casetas de producción, proceso de limpieza de jaulas, fosa de almacenamiento de excretas y aguas residuales, reactores anaeróbicos y/o plantas de tratamiento de aguas residuales. Los RP (Residuos peligrosos) son producto de las casetas de alojamiento, área de enfermería o sanidad preventiva, mantenimiento de equipos mecánicos y elementos utilizados para control de fauna nociva y taller mecánico para el servicio de equipos, y por último, los RSU (Residuo Sólido Urbano) son elementos generados por el personal que labora dentro de granjas, oficinas, baños y comedor comunitario (De Alba, 2019).

Inocuidad de los biosólidos producidos en la UPP

Se estima que en México se genera una producción de 480 mil toneladas al año en base seca del subproducto denominado biosólido (Mejía, 2009), y se tiene un cálculo en el incremento de los biosólidos para el año 2030, a niveles de 880 mil toneladas por año (Rojas y Mendoza, 2012), de origen urbano. No existe información certera sobre la producción de biosólidos producidos por la industria pecuaria.

Los biosólidos son materiales orgánicos ricos en nutrientes, que al ser aplicados al suelo se espera favorezcan la fertilidad edáfica, ya que los biosólidos recuperan la capacidad productiva de los suelos, logrando con ello una reducción en el uso de fertilizantes químicos (Alvarado *et al.*, 2017). Según su procedencia, pueden tener una composición diferente, pero en casi todos se encuentran metales pesados, bacterias y otros microorganismos patógenos e incluso gases, como producto de su descomposición con un consecuente mal olor, aunado a que también son considerados como generadores de altos índices de emisiones de metano (Rojas y Mendoza, 2012). Los biosólidos producidos en cualquier sistema de producción pecuario contienen microorganismos, elementos tóxicos, minerales y nutrientes, los cuales son potencialmente peligrosos para la salud de las personas y de la población asociada con los patógenos microbianos (Alfaro *et al.*, 2015). Por ello, Morales (2014) señala que cualquier desecho relacionado con excretas y efluentes que no hayan recibido tratamiento, presentan microorganismos que pueden ser potencialmente patógenos y ponen en riesgo la salud de los individuos involucrados (Hutchison *et al.*, 2005), ya sea por contacto directo, o a través de vectores como las ratas, perros o insectos (Mantilla *et al.*, 2017).

Por otra parte, el hecho de que aun cuando las UPP's cuenten con sistemas de tratamiento de residuos, no siempre son eficientes, ya que depende del microorganismo y su patogenicidad, así como de aspectos ambientales que pueden ayudar a difundirlos, o a los sistemas de deposición y uso de los residuos (Cuadro 4) (Salazar y Salgado, 2015).

El uso de biosólidos en cultivos de alimentos que se encuentran contaminados por bacterias, virus, hongos, levaduras y/o parásitos, debe ser cuidadoso, por lo que la aplicación de los biosólidos debe hacerse bajo las condiciones más estrictas de inocuidad, y en los momentos apropiados para que no exista posibilidad de que se consuman productos agrícolas contaminados (Polit, 2005). En la fertilización de suelos agrícolas, que son utilizados para la producción intensiva de alimentos para animales y humanos, es común utilizar excretas, efluentes y purines, por lo que, esta actividad ha aumentado en las tres décadas previas, ya que la producción pecuaria y agrícola orgánica se basa en el uso de biosólidos (Alfaro y Salazar, 2015).

Cuadro 4. Supervivencia esperada de diferentes patógenos según el medio en el que se encuentran

Tipo o Fuente	Microorganismos involucrados			
	<i>Salmonella sp</i>	<i>E. coli</i>	<i>M. avium spp. paratuberculosis</i>	Virus
Purín	120 días	60-90 días	1 año	1 año
Excretas	120 días	35 días	1 año	1 año
Suelo	+150 días	+200 días	+ 1 año	1 año
Agua	16-120 días	16-35 días	9-13 meses	1 año
Plantas	+35 días	180 días	+180 días	1 año

Fuente: Salazar y Salgado (2015).

Los biosólidos son un hábitat óptimo para que insectos, como las pulgas (*Siphonaptera*) y mosca doméstica (*Musca domestica*), se conviertan en vectores de enfermedades, las cuales pueden infectar a animales y a humanos (zoonosis) a través de la contaminación de los productos cultivados, pero también por medio del contacto directo con ellos (DGFPSC, 2006). En los depósitos o almacenamientos de estiércol, el dióxido de carbono, (CO₂) pro-

ducido por la actividad microbiana, es el responsable de que baje el nivel de oxígeno. Al tratarse de un gas más denso que el aire, se acumula en las áreas deprimidas, como en el fondo de los depósitos y balsas, desplazando al oxígeno y provocando el desvanecimiento e incluso la muerte del trabajador que allí se encuentre (Ribeiro, 2017).

La comunidad europea (RD 664/1997) tiene una clasificación en cuatro grupos de los riesgos por agentes biológicos cuando se utilizan biosólidos, la cual está asociada al potencial que tienen los microorganismos de los biosólidos de producir, contagiar y propagar infección, dicha clasificación sirve para identificar las posibilidades de prevenir y tratar estos riesgos (Cuadro 5), dicho decreto sigue vigente en el año 2021.

Cuadro 5. Riesgos ocasionados por la aplicación de biosólidos

Grupo	Riesgo
1	Agentes biológicos que resulte poco probable que causen enfermedad en el hombre.
2	Agentes biológicos que pueden causar una enfermedad en el hombre, y suponen un riesgo laboral; pero es poco probable que se propaguen a la colectividad y se cuenta con profilaxis o tratamiento.
3	Agentes biológicos que causan enfermedades graves en el hombre y un serio peligro laboral; con riesgo de propagación y transmisión. Existen generalmente profilaxis y tratamiento eficaz.
4	Agentes biológicos que causan una enfermedad grave en el hombre y un serio peligro para los trabajadores. Con alta probabilidad de propagación a la colectividad, y no existen profilaxis y/o tratamiento eficaz.

Fuente: RD 664/1997.

Dada la naturaleza de deyecciones, el riesgo biológico asociado al manejo de purín o estiércol es extremo debido a la carga microbiológica, de hasta un tercio de la masa total. Las especies patógenas que son posibles encontrar en las deyecciones animales, y que se pueden transmitir al hombre por inhalación, ingestión, contacto o corte, se muestran en el Cuadro 6 (Ribeiro, 2017).

Cuadro 6. Patógenos que se pueden encontrar en las deyecciones de los animales

Bacterias	Protozoos	Helmintos
<i>Escherichia coli</i> O157: H7, <i>Entamoeba histolytica</i> , <i>Yersinia enterocolitica</i> , <i>Clostridium tetani</i> , <i>Clostridium perfringens</i> , <i>Campylobacter jejuni</i> , <i>Salmonella enterica</i> , <i>Listeria monocytogenes</i>	<i>Balantidium sp.</i> , <i>Giardia lamblia</i> , <i>Entamoeba histolytica</i> , <i>Entamoeba polecki</i> .	<i>Ascaris lumbricoides</i> , <i>Fasciola hepática</i> , <i>Taenia saginata</i> , <i>Taenia solium</i> , <i>Equinococcus granulosus</i> , <i>Equinococcus multilocularis</i> .

Fuente: Ribeiro, 2017.

En México, no hay normatividad para coliformes totales en lodos, pero este grupo de microorganismos funcionan como alerta de contaminación, aunque identificar su origen es casi imposible, tienen poca utilidad como indicadores de contaminación fecal, sin embargo, los coliformes totales ayudan a evaluar la eficiencia en las plantas de tratamientos de aguas residuales. Por su parte, Alvarado *et al.* (2017) señalan que los coliformes fecales son indicadores de contaminación fecal en aguas residuales, debido a su relación con el grupo tifoide-paratifoide y a su alta concentración en diferentes tipos de muestras.

De forma general, se puede señalar que los biosólidos no pueden ser clasificados en ninguna de las clases indicadas en la NOM-004-SEMARNAT-2002, debido a que no cumplen con la totalidad de parámetros establecidos (Alvarado *et al.*, 2017).

Agentes patógenos

El parámetro de inocuidad en biofertilizantes se refiere a eliminar la posibilidad de que cause daños a la salud humana, animal o vegetal, para ello se deben eliminar los agentes patógenos (OPS, s/f; Cancino-Mendez *et al.*, 2018). Entre los patógenos de interés epidemiológico presentes en purines de cerdos en México, destacan las bacterias asociadas a problemas respiratorios y sistémicos (*Staphylococcus*, *Streptococcus*, *Mycobacteriaceae*, *Pasteurella*, *Bordetella*, *Glaeserella parasuis*, *Erysipelothrix rhusiopathiae*), las asociadas a problemas diarreicos (*Lawsonia intracellularis*, *Brachyspira hyodysenteriae*, *Escherichia coli* O157:H7, *Salmonella spp.*, *Clostridium perfringens*, *Listeria monocytogenes* y *Campylobacter*

spp.) y las causantes de problemas reproductivos (*Brucella spp* y *Leptospira spp.*) (Roberts *et al.*, 2016). Los coliformes fecales (*Escherichia*, *Klebsiella*) se definen, según la norma NOM-004-SEMARNAT-2002, como bacterias patógenas presentes en el intestino de animales de sangre caliente y humanos y, por tanto, se presentan en los purines y en los biosólidos. Son Bacilos cortos Gram negativos no esporulados, también conocidos como coliformes termo tolerantes. Pueden identificarse por su tolerancia a temperaturas de 44°C-45°C. Tienen la capacidad de fermentar la lactosa a temperatura de 44.5°C (Cancino-Méndez *et al.*, 2018). Sin embargo, existe una gran cantidad de virus que están presentes en las excretas, efluentes y purines y que son potencialmente peligrosos (Rubulavirus porcino, Coronavirus, PRRS, influenza, alfavirus, circovirus, rotavirus). También, hay que considerar a los parásitos (*Ascaris suum*, *Trichuris suis*, *Taenia solium* y *Toxocara spp.*) que afectan a los cerdos y que son difíciles de eliminar, dada su larga sobrevivencia en purines, excretas y efluentes (Graczyk *et al.*, 2008).

Los principales factores que afectan la supervivencia de los agentes patógenos en el medio ambiente son: exposición a rayos solares ultravioleta, deshidratación, aumento de la temperatura, pH extremos y elevada concentración de amoníaco (NH₃) (Cuadro 7). La importancia sanitaria que adquiere esta problemática es la transferencia de agentes patógenos altamente infectocontagiosos para los animales y potencialmente zoonóticos para el humano, dadas las malas prácticas ganaderas como el contacto directo con heces y la contaminación de alimentos o agua de consumo con purines (Salazar y Salgado, 2015).

Cuadro 7. Supervivencia de patógenos en el medio ambiente

Parámetros	Impacto en el patógeno
Temperatura	La mayoría de microorganismos sobrevive bien a temperaturas de 50-40°C. En procesos de compostaje se necesitan temperaturas alrededor de los 65-55°C para eliminar patógenos (excepto esporas bacterianas y microorganismos termorresistentes) en pocas horas. Se recomienda mantener estas temperaturas por al menos una semana.
pH	Las condiciones altamente ácidas o alcalinas tendrán un efecto inactivador. La adición de cal a estiércol, heces secas o lodos residuales incrementará el pH e inactivará a los patógenos. La velocidad de inactivación incrementará con un pH alcalino

Amoníaco	La adición de químicos generadores de amoníaco facilitará la inactivación de patógenos en la excreta o lodos residuales.
Humedad	La humedad está relacionada con la supervivencia del organismo en el suelo y en las excretas; mientras que un proceso de secado reducirá el número de patógenos.
Radiación Solar / Rayos UV	La radiación ultravioleta reducirá el número de patógenos. Esta tecnología es usada como un proceso para el tratamiento tanto de agua potable como de aguas residuales.
Presencia de otros microorganismos	Los microorganismos pueden afectarse unos a otros por depredación, liberación de sustancias antagónicas o competencia.
Nutrientes	La bacteria entérica adaptada para desarrollarse en el tracto gastrointestinal no es siempre capaz de competir con los organismos nativos por los escasos nutrientes, limitando su habilidad de reproducirse y de sobrevivir en el ambiente.
Oxígeno	La actividad microbiana depende de la disponibilidad de oxígeno. En suelos compactados, así como en ambientes húmedos o en aguas residuales, la baja disponibilidad de oxígeno puede afectar la supervivencia de patógenos aeróbicos.

Fuente: Salazar *et al.* (2015).

Reactores anaerobios

Son parte de los tratamientos utilizados en la industria porcina para reutilizar los residuos orgánicos (excretas, purines, aguas residuales). En México, el uso de los reactores anaerobios tienen relativamente poco tiempo, ya que no fue sino hasta finales de la primera década del siglo XXI que los reactores anaeróbicos se difundieron en las UPP's, llegando a tener del año 2008-2011 un total de 386 reactores anaerobios distribuidos en toda la República Mexicana, siendo el estado de Yucatán con la mayor distribución (86), sin embargo, sólo 8% de las UPP's dentro del país cuentan con un sistema de digestión anaerobia (INECC y Semarnat, 2013).

En la agricultura familiar o de traspatio el uso de reactores anaeróbicos ha sido de gran beneficio para los pobladores, ya que se ha constituido como una fuente de energía y fertilizantes orgánicos. Dos Santos *et al.* (2017) demostraron la viabilidad y funcionalidad de reactores anaeróbicos usando como sustrato las excretas porcinas y purines sin tener que realizar una inversión monetaria alta, utilizando los recursos de la región para poder construir y adoptar dicha tecnología.

En un estudio realizado por Li *et al.* (2015) se evaluaron las características fisicoquímicas y la cinética química que presentaban diferentes excretas animales, provenientes de vacas lecheras, aves, conejos y porcinos a diferentes concentraciones (8, 16, 32 y 64 g de sólidos volátiles L⁻¹) de materia orgánica y su transformación por un proceso anaeróbico; determinaron que las excretas porcinas fueron las que obtuvieron mayor porcentaje de biodegradabilidad (95%) de los nutrientes, así como una mejor producción de metano, en comparación con las excretas de bovinos (61%), las cuales contenían un mayor porcentaje de fibra.

Blanco *et al.* (2015) examinaron la transformación de los compuestos biológicos en dos UPP's con diversas densidades poblacionales de animales (20,000 y 1,300 respectivamente); la UPP con menor cantidad de animales fue la que mayor Demanda Química de Oxígeno (DQO) (15,928 mg L⁻¹), presentó, sin embargo, los porcentajes de remoción de materia orgánica más altos (90%) cuando existen 20,000 cabezas.

Digestión anaeróbica

La degradación de la materia orgánica por vía anaerobia se realiza en tres etapas: hidrólisis, fermentación (conocida como acidogénesis) y metanogénesis. En la hidrólisis, la materia particulada (proteínas, polisacáridos, ácidos nucleicos y lípidos) se convierte a compuestos solubles que se hidrolizan a simples monómeros (monosacáridos, aminoácidos, purinas, pirimidinas y ácidos grasos). Es un proceso de biorreacción que permite convertir los purines de cerdo en energía (biogas), así como materiales útiles para suelos agrícolas (biofertilizantes y posibles sustratos en procesos agropecuarios y agroindustriales) (Rivas *et al.*, 2010). Existen ciertos factores que podrían afectar o beneficiar la fermentación, entre los que destacan: la disponibilidad y calidad de nutrientes, tiempo de retención hidráulica (TRH), temperatura, pH, así como el tiempo de permanencia de los purines dentro del biodigestor (Apples *et al.*, 2008).

La carga de materia orgánica, amoníaco libre y ácidos grasos volátiles (AGV) que ingresan al reactor son factores importantes para establecer el tiempo de retención hidráulica (TRH). Solé-Bundó *et al.* (2018) señalaron que la materia orgánica debe estar dentro del reactor al menos 20 días, ya que es importante que el amoníaco libre sea controlado, y por tanto el pH y la temperatura sean estables (Campos, 2001), incluida la DQO y la concentración de ácidos grasos volátiles (AGV). Si todos estos elementos son estables, la eficiencia en la digestión en el RA será satisfactoria y la actividad bacteriana estará controlada (Wijekoon *et al.*, 2011; Sarabia *et al.*, 2017; Meng *et al.*, 2018). En reactores

de flujo continuo, la eliminación de bacterias como *L. intracellularis*, *S. aureus*, *E. coli*, *Salmonella* spp, mesófilos aerobios, Clostridium sulfito reductores, coliformes totales y coccidias, es prácticamente imposible, lo que hace que represente un riesgo sanitario el uso de sus efluentes como *biol* o fertilizante (Galindo-Barboza *et al.*, 2020). En el caso de que el amoníaco libre disminuya, el pH puede bajar debido a la acumulación de AGV (principales intermediarios del proceso), lo cual pone en riesgo el proceso anaeróbico (Campos, 2001).

La temperatura es uno de los factores ambientales más importantes, ya que contribuye al crecimiento o inhibición de microorganismos (Reyes, 2017). Auffret *et al.* (2019) determinaron el impacto de la temperatura estacional (4° a 25°C) en reactores anaeróbicos en una etapa mesofílica, y los cambios en las características físico-químicas de los subproductos obtenidos de la digestión anaerobia en excretas porcinas y bovinas, no obstante, no se observaron cambios en los minerales (Cu y Zn) ocasionados por las variaciones de temperatura. Se debe proveer una temperatura homogénea en los reactores anaeróbicos, por tanto, existen tres rangos de temperatura ideales en los que deben funcionar, y en los que los microorganismos anaeróbicos realizarán la fermentación: temperatura psicrófila, por debajo de 25°C; mesofílica, entre 25 y 45°C, y termofílica entre 45 y 65°C (FAO, 2011).

Aun con las ventajas de un digestor termofílico para conseguir una mayor velocidad del proceso y, a la vez, un aumento en la eliminación de organismos patógenos, éste suele ser más inestable a cualquier cambio de las condiciones de operación y presenta, además, mayores problemas de inhibición del proceso por la mayor toxicidad de determinados compuestos a elevadas temperaturas, como el nitrógeno amoniacal o los ácidos grasos de cadena larga. En el Cuadro 8 se muestran los rangos de temperatura a la que operan los distintos tipos de reactores (Mantilla *et al.*, 2017).

Cuadro 8. Temperatura en los reactores y tiempo de fermentación anaeróbica

Tipo de reactor	Rasgos de temperatura (°C)			Tiempo de fermentación anaeróbica (días)
	Mínimo	Óptimo	Máximo	
Psicofílico	4-10	15-18	20-25	<100
Mesofílico	15-20	25-35	35-45	30-60
Termofílico	25-45	50-60	75.80	10-15

Fuente: Mantilla *et al.*, 2017.

Actividad viral en los procesos de biodigestión anaerobia

Con respecto a los virus, resulta complejo especificar si el origen de los mismos, y que han sido encontrados en los residuos biológicos, son provenientes de animales o humanos, ya que en muchas ocasiones el purín animal se mezcla con aguas residuales producidas por humanos (Yates y Yates, 2007; Ziemer *et al.*, 2010). Sin embargo, es importante señalar que los virus, por su naturaleza, muestran diferente comportamiento por su asociación con sólidos en suspensión, temperatura ambiente, pH, metabolitos volátiles y disueltos, la presencia de diversos microbios y por la presencia de detergentes y desinfectantes disueltos en las excretas (Pesaro *et al.*, 1995).

Fongaro *et al.* (2014) estudiaron el comportamiento de virus gastroentéricos –Virus de la enteritis porcina; Norovirus porcino (PoNoVs), Sapovirus porcino (PoSaVs), Rotavirus (RV-A, RV-B, y RV-C– presentes en excretas frescas y tratadas, debido a su alta patogenicidad y prolongada infectividad, a su estabilidad en el ambiente, resistencia a desinfectantes, y sin dejar de lado su actividad zoonótica, observando que los virus tienen diferente comportamiento, ya que los tratamientos aplicados a las excretas pueden afectar la presencia del material genético viral y la detección de partículas virales infecciosas. La presencia de virus en las excretas y en los purines también está asociada al origen por etapa productiva de los cerdos, lo cual debe considerarse al momento de establecer el proceso de biodigestión en reactores anaeróbicos (Pesaro *et al.*, 1995; Fongaro *et al.*, 2014), ya que en cada etapa productiva la carga viral y la especie viral puede ser diferente.

El tiempo de retención hidráulica (TRH) en el reactor y la temperatura inicial a la que son sometidos los residuos orgánicos impactan en la eliminación de los virus. Lund *et al.* (1996) señalaron que para eliminar el parvovirus porcino se requiere una temperatura de 55°C durante las primeras 12 horas de permanencia en el reactor, y mantenerse a esa temperatura durante al menos 4 horas. Sin embargo, en reactores de flujo continuo las temperaturas pueden variar y eso podría afectar la eliminación de los virus.

La temperatura para poder inactivar un virus puede ser desde los 20°C, durante al menos siete días, a través del calor generado en las áreas donde alojaron experimentalmente a los cerdos; mientras que a 71°C, durante 10 min, en remolques metálicos motorizados (tráileres) y/o superficies metálicas se podrá inactivar el virus de la Diarrea Epidémica Porcina (Thomas *et al.*, 2015). El circovirus y adenovirus porcino han mostrado ser resistentes a cambios de temperatura en el ambiente, así como a procedimientos de desinfección (Viancelli, 2013; Fongaro *et al.*, 2016), y esto muestra un aspecto negativo del proceso de biodigestión, ya que para su eliminación debe existir una temperatura por

arriba de los 50°C. No obstante, en el caso del virus del Síndrome Respiratorio y Reproductivo Porcino (PRRS), la utilización de ozono, luz ultravioleta y una mezcla de desinfectantes ha logrado disminuir la carga viral a los 10 min de su aplicación (Yong-Dae y Won-Il, 2013), mientras que el *Rubulavirus porcino*, agente etiológico de la enfermedad de Ojo Azul, puede ser inactivado a una temperatura de 70°C durante 20 min, según lo reportado por Borraz-Argüello *et al.* (2008).

Por otra parte, existen datos en donde se señala la persistencia del *Rubulavirus porcino* en el semen de machos, que puede prolongarse durante 60 días post-infección (Rivera-Benítez *et al.*, 2013), por lo que los residuos de los eyaculados y agua residual, producto de la limpieza del material en contacto, puede contaminar los purines y, por tanto, infectar los biosólidos que ingresan al biorreactor.

Con relación a enterovirus bovino, en un estudio realizado por Ligocka *et al.* (2016) se determinó la efectividad que tienen dos tipos de tecnologías en la inactivación de este virus: composta y digestión anaerobia, esta última, al ser un proceso que al menos tiene un TRH de más de 10 días, es eficaz para la inactivación de enterovirus bovino proveniente de desechos cárnicos bajo condiciones termofílicas de 55°C, mientras que en condiciones mesofílicas (37°C), a los 28 días, no se detectaron partículas víricas viables.

Bacterias persistentes a procesos de biodigestión anaerobia

Varios géneros de bacterias patógenas han sido identificados en membranas de filtración de biorreactores, tales como *Acinetobacter*, *Pseudomonas* y *Stenotrophomonas*, mismas que tienen la capacidad de nitrificar el medio en el que se desarrollan, sin embargo, el uso de membranas en los reactores anaerobios puede ser útil en un proceso previo a la fermentación anaerobia, ya que su aplicación permite la retención de partículas víricas o bacterianas debido al poro que tiene la membrana (Harb y Hong, 2017). Asimismo, existe la codigestión anaerobia de excretas ovinas, excretas porcinas y agua destilada, no obstante, se puede observar la presencia de microorganismos patógenos como *Staphylococcus* y *Salmonella spp.*, coliformes totales y coliformes fecales en un biofertilizante líquido (Medina *et al.*, 2015).

El análisis de aguas residuales provenientes de granjas porcinas señala la necesidad de aplicar diferentes tratamientos para la eliminación de coliformes totales, tal es el caso de la digestión aerobia y anaerobia, en la que se puede observar una reducción de 2.4×10^8 a 1.7×10^3 NMP 100 ml⁻¹, en una UPP con una población animal de 20,000, mientras que, en una UPP con menor densidad animal (1,300 animales), se observa una

disminución de 4.2×10^7 a 2.7×10^3 NMP 100 ml⁻¹. Por los resultados antes señalados, se puede establecer que el hecho de tener una densidad animal menor, no necesariamente reduce la producción de coliformes totales (Blanco *et al.*, 2015).

CONCLUSIONES

La normatividad nacional vigente no está relacionada con la gestión de los residuos orgánicos de granja porcina, y el uso de reactores anaeróbicos en México es limitado, aun con el efecto benéfico de su uso en el medio ambiente, adicional a la obtención de subproductos que tienen un valor agregado y pueden beneficiar la economía de las UPPs. Aunque es necesario considerar que el proceso de fermentación anaerobia ha resultado ser ineficiente, ya que se ha demostrado que en los biosólidos persisten microorganismos patógenos (bacterias y virus), así como la persistencia que poseen ante condiciones físicas, químicas y/o ambientales, representando un peligro para el medio ambiente y los seres vivos por su distribución indiscriminada en suelos agrícolas. Es por esto, que se debe enfatizar la vigilancia y observancia continua de los reactores anaerobios para obtener un producto inocuo y para proteger el ambiente, la salud humana y animal.

AGRADECIMIENTOS

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología por el patrocinio económico brindado para la realización de este proyecto, así como de los proyectos institucionales financiados dentro de la Universidad Autónoma Metropolitana, asimismo al Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP), en especial al Centro Nacional de Investigaciones Disciplinarias Microbiología y al grupo de colaboradores por su constante aporte científico para la culminación de este proyecto.

BIBLIOGRAFÍA

- Alfaro, M. *et al.* (2015). "Tratamientos para reducir la carga de patógenos en purines", en Salazar, F. y V. Alfaro, *Buenas prácticas ganaderas para reducir la carga de patógenos en purines* (27-42). México: Instituto de Investigaciones Agropecuarias.
- Alvarado, J. *et al.* (2017). "Contaminación potencial por biosólidos depositados en un campo deportivo. Biotecnia", en *Revista de Ciencias Biológicas y de la Salud*, XIX(2): 13-18.
- Antezana, W. (2016). *Análisis de los factores que influyen en las emisiones de amoníaco y metano de purines porcinos: composición del purín y factores nutricionales*. Tesis de doctorado. España: Universitat Politècnica de Valencia.
- Apples, L. (2008). "Principles and potential of the anaerobic digestion of waste-activated sludge", en *Prog Energy Combust Sci.* 34(6): 755-781.
- Auffret, D. *et al.* (2019). "Impact of seasonal temperature transition, alkalinity, and other abiotic factors on the persistence of viruses in swine and dairy manures", en *Science of the Total Environment*, 659: 640-648.
- Blanco, D. *et al.* (2015). "Eficiencia del tratamiento de aguas residuales porcinos en digestores de laguna tapada", en *Pastos y forrajes*, 38(4): 441-47.
- Borraz, M. *et al.* (2008). "Caracterización biológica de tres aislamientos naturales de *Rubulavirus porcino* (México)", en *Revista de Biología Tropical*, 56(2): 487-99.
- Bragachini, A. *et al.* (2016). *Residuos pecuarios: una problemática que puede transformarse en oportunidad*. INTA.
- Campos, A. (2001). *Optimización de la digestión anaerobia de purines de cerdo mediante codigestión con residuos orgánicos de la industria agroalimentaria*. Tesis Doctoral. Universitat de Lleida. España.
- Cancino, G. *et al.* (2018). "La inocuidad de lixiviados de biofertilizantes factor de calidad para uso en agricultura orgánica", en *Revista del Centro de Graduados e Investigación*, Instituto Tecnológico de Mérida, 33(72): 121-125.
- CCA. Comisión para la Cooperación Ambiental. (2017). *Caracterización y gestión de la pérdida y el desperdicio de alimentos en América del Norte*, informe sintético. Montreal. Disponible en: <http://www3.cec.org/islandora/es/item/11772-characterization-and-management-food-loss-and-waste-in-north-america-es.pdf> (Consultado: 16/09/2020).
- Costantini, P. *et al.* (2007). "Effects of different animal waste treatment technologies on detection and viability of porcine enteric viruses", en *Applied and environmental microbiology*. 73. (16): 5284-5291.

- De Alba, H. (2019). Caracterización de los residuos de la industria porcícola y su marco regulatorio. Disponible en: <https://www.porcicultura.com/destacado/Caracterizacion-de-los-residuos-de-la-industria-porcicola-y-su-marco-regulatorio> (Consultado: 05 /08/2020).
- DGFPCS. (2006). Agentes biológicos en las tareas agrícolas. Dirección General de la Función Pública y Calidad de los Servicios. Escuela Administración Pública. Región de Murcia. Consejería de Economía y Hacienda.
- Dos Santos, S. *et al.* (2017). “Construção de um biodigestor caseiro como uma tecnologia acessível a suinocultores da agricultura familiar. PUBVET”, en *Medicina Veterinaria e zootecnia*. 11(3): 290-297.
- Ejarque, M. *et al.* (2019). “Prácticas y usos de los residuos pecuarios de productores familiares en un valle de la Patagonia argentina”, en *Ambiente y Desarrollo* 23(44).
- FAO. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación. (2011). *Manual de biogás. Remoción de Barreras para la Electrificación Rural con Energías Renovables*. Santiago de Chile: FAO.
- Fongaro, G. *et al.* (2014). “Utility of specific biomarkers to assess safety of swine manure for biofertilizing purposes”, en *Science of The Total Environmental*, 479-480: 277-283.
- Fongaro, G. *et al.* (2016). “Settling and survival profile of enteric pathogens in the swine effluent for water reuse purpose”, en *International Journal of Hygiene and Environmental Health*, 219(9): 883-889.
- Galindo, A. *et al.* (2020). “Mitigación y adaptación al cambio climático mediante la implementación de modelos integrados para el manejo y aprovechamiento de los residuos pecuarios. Revisión”, en *Rev. Mexicana de Ciencias Pecuarias*, 11 Supl. 2: 107-125.
- Graczyk, K. *et al.* (2008). “Ocurrence of Cryptosporidium and Giardia in seswage sludge and solid waste landfill leachate and quantitative comparative analysis of sanitization treatments on pathogen inactivation” en *Environmental Research*. Vol. 106. pp. 27-33.
- Guevara, J. *et al.* (2012). “Gestión ambiental”, en Castillo Pérez, Susana Verónica del, Ruíz, Álvaro, Hernández, Jesús y Josep Gasa (Eds.). *Manual de Buenas Prácticas de Producción Porcina. Lineamientos generales para el pequeño y mediano productor de cerdos* (78-96). Red Porcina Iberoamericana.
- Harb, M. y Hong, Y. (2017). “Molecular based detection of potentially pathogenic bacteria in membrane bioreactor (MBR) systems treating municipal wastewater: a case study”, en *Environmental Science Pollution Research*, 24(6): 5370-80.
- Hutchison, L. *et al.* (2005). “Fate of pathogens present in livestock wastes spread onto fescue plots”, en *Applied and Environmental Microbiology*, 71(2): 691-696.

- INECC, Semarnat. (2013). *Diagnóstico Básico para la Gestión Integral de los Residuos*. México.
- Inegi (2019). *Encuesta Nacional Agropecuaria*. México: Inegi.
- Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos. Diario Oficial de la Federación, publicado el 08 de octubre del 2003. Última reforma publicada el 19 de enero del 2018.
- Li, K. *et al.* (2015). "Comparison of anaerobic digestion characteristics and kinetics of four livestock manures with different substrate concentrations", en *Bioresource Technology*, 198: 113-140.
- Ligocka, A. *et al.* (2016). "Composting and anaerobic digestion technologies as methods for reduction of virus transmission in the environment", en *Environmental Protection Engineering*, 42(2): 137-144.
- Lund, B. *et al.* (1996). "Inactivation of virus during anaerobic digestion of manure in laboratory scale biogas reactors", en *Antonie van Leeuwenhoek*, 69: 25-31.
- Manser, N. *et al.* (2015). "Semi-continuous mesophilic anaerobic digester performance under variations in solids retention time and feeding frequency", en *Bioresource Technology*, 190: 359-366.
- Mantilla, G. *et al.* (2017). *Energía limpia del agua sucia: aprovechamiento de lodos residuales*. México: Asociación Mexicana de Empresas de Agua y Saneamiento de México Instituto Mexicano de Tecnología del Agua.
- Medina, A. *et al.* (2015). "Evaluación de la calidad de biol de segunda generación de estiércol de ovino producido a través de biodigestores", en *Anales científicos*, Perú, 76 (1): 116-124.
- Mejía, E. (2009). Academia de Ingeniería México. Disponible en: <http://www.ai.org.mx/ai/archivos/talleres/aprovechamiento-lodos/Aspectos%20tecnicos%20y%20legales%20del%20manejo%20de%20lodos%20en%20Mexico.pdf>.
- Meng, X. *et al.* (2018). "Endogenous pH buffer system with ammonia-carbonates-VFAs in high solid anaerobic digestion of swine manure. An alternative for alleviating ammonia inhibition?", en *Process Biochemistry*, 69: 144-52.
- Morales, D. (2014). *Identificación de microorganismos patógenos e indicadores de contaminación en un biodigestor alimentado con heces de rumiantes*. Tesis Profesional. UNISON.
- NAE-SEMADES-003/2004. Norma Ambiental Estatal que establece los criterios y especificaciones técnico ambientales para la prevención de la contaminación ambiental, producida por el manejo inadecuado de los residuos orgánicos pecuarios, denominados cerdaza, generados en aprovechamientos porcícolas en el Estado de Jalisco. Fecha de publicación: 7 de febrero 2006.

- NAE-SEMADES-004/2004. Norma Ambiental Estatal que establece los criterios técnico ambientales para la prevención de la contaminación ambiental, producida por el manejo inadecuado de cadáveres porcinos, generados en aprovechamientos porcícolas en el Estado de Jalisco. Fecha de publicación: 8 de Diciembre 2005.
- Negrin, A. y Jiménez, Y. (2012). "Evaluación del efecto agronómico del biosólido procedente de una planta de tratamiento por digestión anaerobia de residuales pecuarios en el cultivo de frijol (*Phaseolus vulgaris L*)", en *Cultivos tropicales*, 3(2).
- NOM-001-ECOL-1996. Norma Oficial Mexicana que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las aguas residuales en aguas y bienes nacionales. DOF: 30 de octubre de 1996.
- OSU. (2015). Production and characteristics of swine manure. Oklahoma State University. Extension facts. Disponible en: <https://pingpdf.com/pdf-f-1735-production-and-characteristics-of-swine-manure.html> (Consultado: 09/09/2020).
- OPS. Organización Panamericana de la Salud. s/f. Educación en inocuidad de los alimentos: Glosario de términos. Disponible en: https://www.paho.org/hq/index.php?option=com_content&view=article&id=10433:educacion-inocuidad-alimentos-glosario-terminos-inocuidad-de-alimentos&Itemid=41278&lang=es (Consultado: 03/12/ 2020).
- NOM-004-SEMARNAT-2002. Protección ambiental. Lodos y biosólidos. Especificaciones y límites máximos permisibles de contaminantes para su aprovechamiento y disposición final. DOF: 15 de agosto 2002.
- Pesaro, F. *et al.* (1995). "In situ inactivation of animal viruses and a Coliphage in nonaerated liquid and semiliquid animal wastes", en *Applied and Environmental Microbiology*, 61(1): 92-97.
- Polit, E. (2005). Inocuidad de los alimentos: Más que buenas prácticas agrícolas. Oficina de estudios y políticas agrarias. Chile. Disponible en: <https://www.odepa.gob.cl/publicaciones/articulos/inocuidad-de-los-alimentos-mas-que-buenas-practicas-agricolas-2> (Consultado: 10/09/2020).
- Potisek, M. *et al.* (2010). "Aplicación de biosólidos al suelo y su efecto sobre contenido de materia orgánica y nutrimentos", en *Terra Latinoamericana*, (28)4: 327-333.
- RD 664/1997. Protección de los trabajadores contra los riesgos relacionados con la exposición de agentes biológicos durante el trabajo. Real Decreto. Instituto Nacional de Seguridad y Salud en el Trabajo.
- Reyes, A. (2017). "Generación de biogás mediante el proceso de digestión anaerobia, a partir del aprovechamiento de sustratos orgánicos", en *Revista Científica de FAREM-Estelí. Medio ambiente, tecnología y desarrollo humano*, 24: 60-81.

- Ribeiro, P. (2017). *Análisis y prevención de riesgos en el uso de fertilizantes en agricultura*. Máster en Prevención de Riesgos Laborales y Riesgos Comunes. España: Universidad Da Coruña.
- Rivas, O. *et al.* (2010). "Biodigestores: factores químicos, físicos y biológicos relacionados con su productividad", en *Technol*, 23(1): 39-46.
- Rivera, J. *et al.* (2013). "Persistence of porcine rubulavirus in experimentally infected boars", en *Veterinary*, 162(2-4): 491-498.
- Roberts, N. (2016). "Decay rates of zoonotic pathogens and viral surrogates in soils amended with biosolids and manures and comparison of qPCR and culture derived rates", en *Science of the total environment*, 573: 671-679.
- Rojas, R. y E. Mendoza. (2012). "Utilización de biosólidos para la recuperación energética en México", en *Producción + Limpia*, 7(2): 74-94.
- Salazar, F. y A. Salgado. (2015). "Manejo de purines y sus patógenos en predios lecheros", en Salazar, F. y V. Alfaro. *Buenas prácticas ganaderas para reducir la carga de patógenos en purines* (7-11). México: Instituto de Investigaciones Agropecuarias.
- Sarabi, A. *et al.* (2017). "Producción de biogás mediante codigestión anaerobia de excretas de borrego y rumen adicionadas con lodos procedentes de una planta de aguas residuales", en *Rev. Int. Contam. Ambie.* 33(1): 109-116.
- Senasica. (2016). *Manual de Buenas Prácticas Pecuarias en la Producción de Granjas Porcícolas*. Servicio Nacional de Sanidad, Inocuidad y Sanidad Agroalimentaria. 2^{da} edición. México: Senasica.
- SIAP. (2019). *Población ganadera. Inventario 2019*. México: Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera.
- Solé, M. *et al.* (2018). "Strategies to optimize microalgae conversion to biogás: Co-digestion, pretreatment and hydraulic retention time. *Molecules*", 23(2096): 1-16.
- Thomas, R. *et al.* (2015). "Evaluation of time and temperature sufficient to inactivate porcine epidemic diarrhea virus in swine feces on metal surfaces", en *J. Swine Health Prod.* Vol. 23 No. 2. pp. 84-90.
- Vera, I. *et al.* (2014). "Potencial de generación de biogás y energía eléctrica parte I: excretas de ganado bovino y porcino", en *Ingeniería Investigación y Tecnología*, 15(3): 429-436.
- Viancelli, A. *et al.* (2013). "Performance of two swine manure treatment systems on chemical composition and on the reduction of pathogens", en *Chemosphere*, 90(4): 1539-44.
- Vicari, P. (2012). Efluentes en producción porcina en Argentina: generación, impacto ambiental y posibles tratamientos. Trabajo final de Ingeniería en Producción Agropecuaria. Pontificia Universidad Católica Argentina.

- Wijekoon, C. *et al.* (2011). "Effect of organic loading rate on VFA production, organic matter removal and microbial activity of a two-stage thermophilic anaerobic membrane bioreactor", en *Bioresouce Technology*, 102: 5353-60.
- Yates, V y S. Yates. (2007). *Assessing the Fate of Emerging Pathogens in Biosolids*. Water Environment Research Foundation.
- Yong, Y. y K. Won-Il. (2013). "Effects of ozone, ultraviolet and an organic acid-based disinfectant against porcine reproductive and respiratory syndrome virus", en *Korean Journal of Veterinary Service*, 36(3): 157-62.
- Ziemer, J. *et al.* (2010). "Fate and transport of zoonotic, bacterial, viral, and parasitic pathogens during swine manure treatment, storage and land application", en *J. Anim. Sci.*, 88(13): 84-94.