



Fernando R. Feuchter A.
UNIVERSIDAD AUTÓNOMA CHAPINGO
Centro Regional Universitario del Noroeste
feuchter57@yahoo.com

CRUNO



Tecnologías para producir biogás con un biorreactor porcino

RESUMEN

Este artículo aporta conocimientos, tecnologías, sistemas de producción, la aplicación de ideas prácticas, información científica y contribuciones reales para conocer las múltiples fases y factores en la producción de gas metano, con ello poder generar ingresos y valores integrados a la economía circular de una granja porcina en confinamiento, aprovechando rentablemente las excretas para producir con el biogás energía calórica y generar electricidad, como aprovechar sosteniblemente la materia orgánica como mejorador de suelos agrícolas. No busca resaltar filosofías, éticas y teorías morales sobre los efectos antropocéntricos secundarios y negativos del calentamiento global. La humanidad tiene el derecho de utilizar los recursos naturales, pero está muy lejos de poseer la libertad de destruir el planeta. En realidad, la tierra te la prestan tus nietos, no la has heredado, ni comprado. Los reportes del clima mundial seguirán pronunciando más olas de calor, sequías, inundaciones, tormentas geomagnéticas con desprendimientos de la corona solar que causan auroras, e incluso noticias del colapso de las corrientes oceánicas, que movilizan los nutrientes de los ecosistemas marinos, incluyendo la presencia del ciclo de la niña y el niño. La población del mundo necesita alimentarse y ello invita a ser partícipes de la conservación de los recursos naturales. La alimentación es esencial para la vida humana, pero también libera al ambiente 50% del metano CH_4 , 2/3 del óxido nítrico-nitrito N_2O y 3% del bióxido de carbono CO_2 de las diversas actividades humanas. El sector agropecuario debe participar en ser más eficiente productivamente, económicamente rentable y menos contaminante, al menos capturar y neutralizar sus propios desechos y emisiones.

Con su lectura deseo despertar en el lector la creatividad para diseñar su propio modelo, hacer ajustes en las instalaciones existentes, que permitan eficiencias y mejoras de manejo en la granja. Sí, es momento oportuno de hacer oración, tomar iniciativas económico-ambientales de participación y solución, no de cruzarse las manos. La hoja dominical invita a pensar, hablar, sentir y actuar. Acciones bajo mi control y en las que pueda participar y contribuir. Lo que hagas como productor y asesor es lo que cuenta.

Próxima revisión bibliográfica 2024 con 200 referencias o artículos publicados para su consulta.

ANTECEDENTES HISTÓRICOS

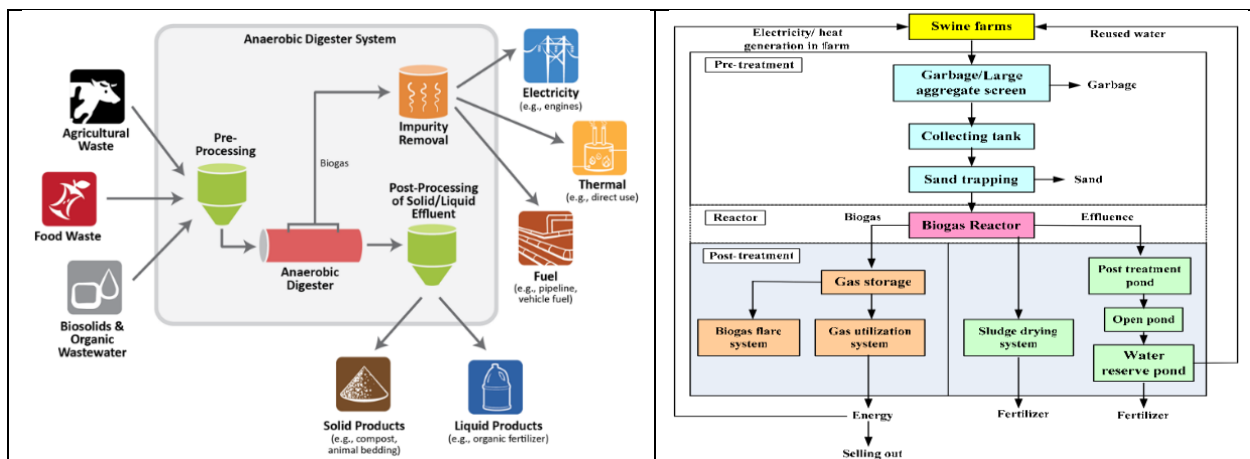
La fermentación anaeróbica es una de las herramientas disponibles en el siglo XXI que ofrece ventajas para la transformación de heces a energía, hay más de 300 diseños. La fermentación del vino registra 8000 a. de C. El proceso antiguo se conoce en Asia desde el siglo XXVI antes de nuestra era. Neshat 2017 enuncia que historiadores de Asiria y Persia describen el proceso de formar gas para calentar el agua de baño X siglos antes de Cristo, algo así como coleccionar orines de esclavos para teñir la ropa. Tener baños de vapor o albercas con agua caliente ha sido una tecnología que se extendió en el tiempo y geografía hasta el siglo XVI después de C. En el siglo XVII Jan Baptista van Helmont determinó que el gas provenía de la descomposición de la materia en putrefacción. En 1776 el conde Alejandro Volta reporta la correlación de materia orgánica a gas producido. En 1804 Johan Dalton y Humprey Davy descubren que el gas invisible producido en la digestión anaeróbica es metano. Para 1959 en Bombay, India se instala la 1era planta de biodigestión. Se usa como iluminaria pública en 1900's en la ciudad de Exeter, UK con gas producido con el drenaje urbano, incluyendo las evacuaciones intestinales. Hasta 1930. Buswell identifica bacterias anaeróbicas que producen metano y se entienden los mecanismos de descomposición orgánica, procesos químicos y microbiológicos. Cuba instala digestores en 1940. China hacía lo propio para uso doméstico con desechos agrícolas y en 1940's en Alemania el biogás era combustible para el transporte municipal. Para 1970's China continuó instalando 10 millones de biodigestores caseros al igual que India adoptó estos bioprocesos energéticos para 4.5 millones de familias. Muchas personas se han beneficiado con estos minireactores para el hogar. Un programa en Latinoamérica implementa en 1970 biodigestores caseros, Jamaica crecen en 1988, Perú en los Andes 2006. En Mount Pleasant, Iowa el 10 de mayo de 1972 el primer biorreactor anaeróbico porcícola estaba funcionando en EUA. Después se harían pruebas con bunkers de concreto armado y otros diseños. Pero en sí, su aplicación no prosperó extensivamente en los Estados Unidos de América EUA, ni vendiendo créditos de carbón para bajar la huella ambiental al mercado de valores. Todavía hay un gran potencial para desarrollarse en todo el mundo. Las empresas de la comida rápida en EUA están participando en la compra de bonos de mercado y compran carne a las granjas que tienen biorreactores de energías limpias. En escala grande de digestión anaerobia, en 2009 Belice usando una laguna cubierta con polietileno. El Instituto internacional de recursos renovables IRRI-México en 2012 inició la instalación de 265 biodigestores. Argentina en 2020 han instalado biodigestores grandes, le siguen Chile y Colombia.



INTRODUCCIÓN. SISTEMAS DE BIORREACTORES PORCINOS

No hay que esperar al año 2030 para reducir el impacto ambiental y valorizar el modelo de negocio potencial con las excretas como un insumo económicamente viable para transformarlo en bienes y servicios empleando nanotecnología innovadora para dejar que sea un producto de desecho. Los excrementos son un recurso o materia prima para incrementar niveles de producción de alimentos de origen animal con la neutralización de carbono, producir energía y crear mejorador de suelos agrícolas para obtener un ingreso adicional a la acostumbrada venta de animales en pie. El mundo crece en población, la prosperidad demanda incrementos en el consumo de carne y para mejorar la salud humana y longevidad ingieren proteína animal. A mayor demanda de carne, más granjas se construyen y muchos más animales que alimentar.

Los países del continente europeo y en particular España encabezan un crecimiento en la producción de proteína animal, sobresaliendo la porcicultura. Se implementa un programa de manufactura sostenible con las excretas, integrando procesos agroindustriales de valor agregado hacia una bioeconomía circular verde, aprovechando con creatividad los desperdicios contaminantes atmosféricos y ambientales, transformándolos en múltiples alternativas ecoeficientes de productos y servicios. Desde el 2024 es obligatorio al menos una cubierta de perlita flotante en las lagunas porcinas con aplicación neumática de hasta 10 centímetros para que los gases que causan un efecto de invernadero (GEI) no sean liberados a la atmósfera. Se pueden remover nutrientes del 98% para derivados del amonio N- NH_4^+ sin desperdiciar el fósforo PO_4^{3-} para uso agropecuario y además generar energía eléctrica para bajar costos de la granja como vender excedentes a la red de conexión federal.

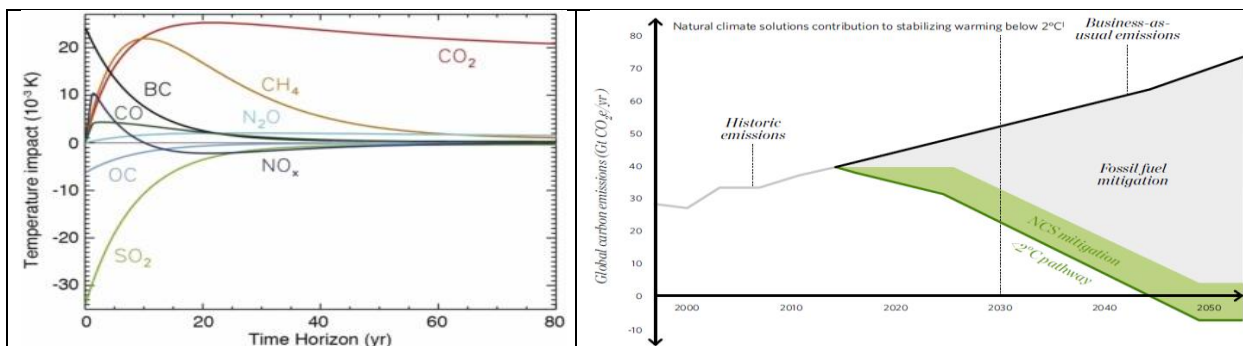


Ya no hay desechos o desperdicios para tirar a la basura, todo es materia prima, hasta el biogás se recicla, el calor generado se integra al sistema de producción y las compostas son el sustento alimenticio para generar proteína con la crianza de insectos comestibles (*Acheta domesticus*, *Alphitotius diaperinos*, *Grylloses sigillatos*, *Gryllus assimilis*, *Hermetia illucens*, *Musca domestica*, *Tenebrio molitor*). Actividad productiva que está prosperando en el mundo.

Tecnologías de 1era generación es usar caña de azúcar para producir etanol; 2da usar desechos urbanos, agrícolas, forestales; 3era producir biocombustibles con algas rojas y marrón; *Pistia stratiotes*, *Neochloris oleoabundans*, *Chlorococcum*; microalgas, espirulina, *Chlorella* y otros cultivos unicelulares, se colectan carotenoides de spirilloxantin $C_{42}H_{60}O_2$ con propiedades antioxidantes; 4ta generación usar aguas residuales urbanas para producir energía y descontaminar el medio líquido para uso de riego. Una realidad en el puerto de Topolobampo, Sinaloa con el proyecto Mexinol que transforma gas metano en hidrógeno verde líquido que puede ser transportado en barco al puerto de Mazatlán. Algo similar en Finlandia una planta de biogás con energía renovable lo comprime a líquido para generar 100 GWh/año, más fertilizantes. Noruega colaborará con ellos en el 2025. La producción de H_2 vía la técnica de reformación del vapor de CH_4 con un cambio de agua gasificada produce Hidrógeno y CO. El H_2 calorífico de 122 kJ por gramo comparado con gasolina 40 kJ/g. Hay 30 plantas de desechos urbanos en México que generan electricidad. Otros usan efluentes para el cultivo de algas.

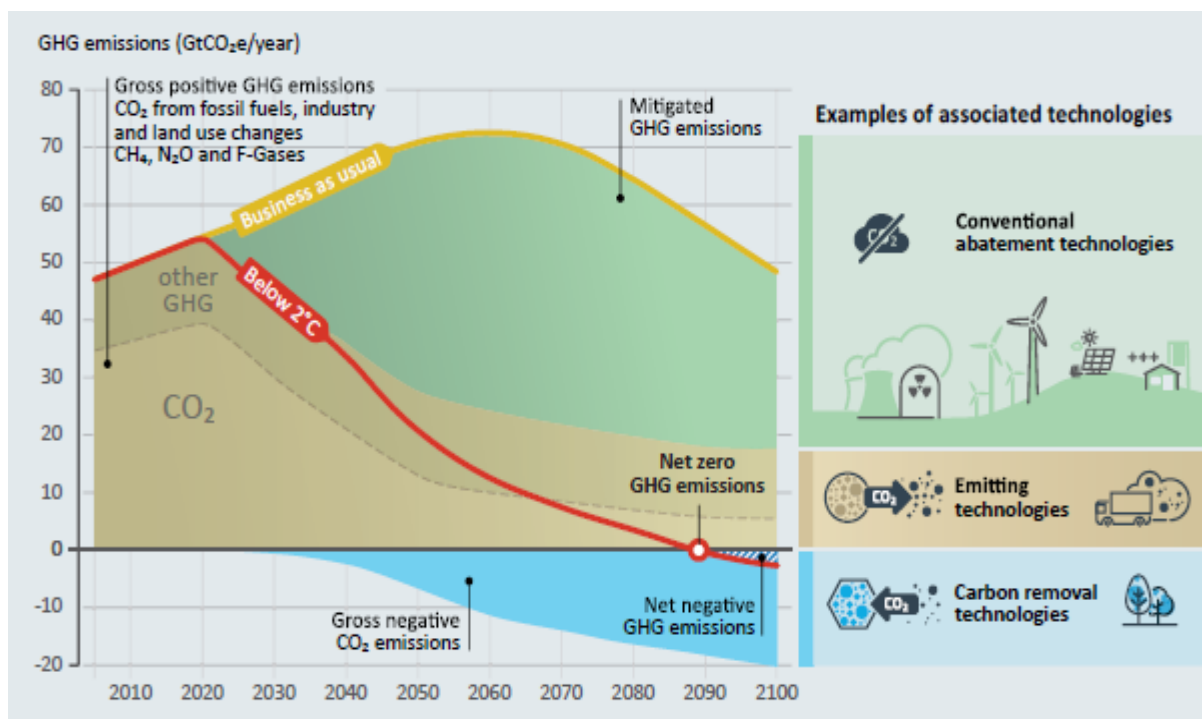


Una composta sólida utiliza en el metabolismo del carbono el 50% de la materia orgánica para el crecimiento microbiano, por ello se calienta la pila de excretas en estabilización. Si es por medio de vermicomposta de lombrices se estabiliza la materia orgánica y se convierte en un mejorador de suelos. Hay 4,000 especies de lombrices, pero tan solo 12 son cultivadas. La más popular es *Eisenia fétida*. Y la fracción de los líquidos de salida son un sustrato para el cultivo de microalgas u otros organismos y obtener derivados de proteína unicelular para alimento animal. En el cultivo de una microalga *Neochloris oleoabundans* se obtienen lípidos para biocombustible: Biodiesel, bioetanol, biometano, biohidrógeno. https://www.youtube.com/watch?v=_VjfpeZhrKw. Muchas empresas en el mundo participan voluntariamente al programa Zero Contaminantes 2040 y están comprometidos con la jornada de la coalición internacional del cambio climático 2050.



Acciones persistentes reducirán $2^\circ C$ la temperatura del globo terráqueo.

Para el año 2050 cualquier sistema de producción deberá ser contaminador neutro de bióxido de carbono con mínimos emisiones de gases con efecto de invernadero GEI. Se declina la energía fósil (grafito, petróleo) por recursos renovables o electricidad verde, siguiendo las indicaciones de cambios y recomendaciones conforme avanza la ciencia.

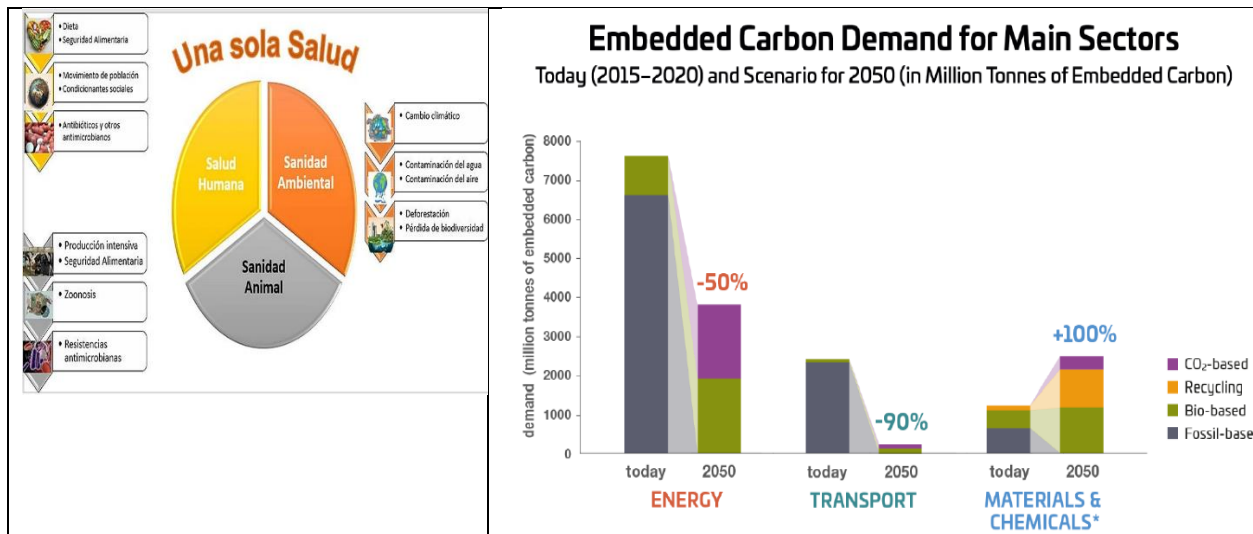


No hay que seguir los ejemplos de energías limpias propia de los líderes que encabezan la lista mundial de la contaminación como China, EUA con casi 1 millón de pozos petroleros, Rusia e India. Son las acciones individuales las que revierten el problema del cambio climático para la humanidad. Muchos pozos abandonados tienen fugas al aire de gases. Rusia, Irán, Turkmenistán, Arabia Saudita, Iraq, Venezuela, México, Libia queman con antorchas al aire libre gas metano de los yacimientos, sin ninguna transformación debido a falta de tecnologías o modelo de negocio para aprovechar esta energía de la extracción del petróleo. El gas es un recurso que se tira y contamina sin beneficio alguno. El Summit 2024 ofrece respuestas al desperdicio de gas metano proveniente de la extracción de los yacimientos.

<https://www.industrialdecarbonizationnetwork.com/events-methane-tech-and-innovation>

Noruega como ejemplo a adaptar se destacan por los mejores controles para evitar emisiones de gases petroleras.

Cada país en particular puede tomar la iniciativa de una sola salud (humana-animal) para resaltar en su campo de acción y minimizar las emisiones contaminantes con una matriz energética de tecnología propia y adecuada económicamente a la idiosincrasia cultural regional.



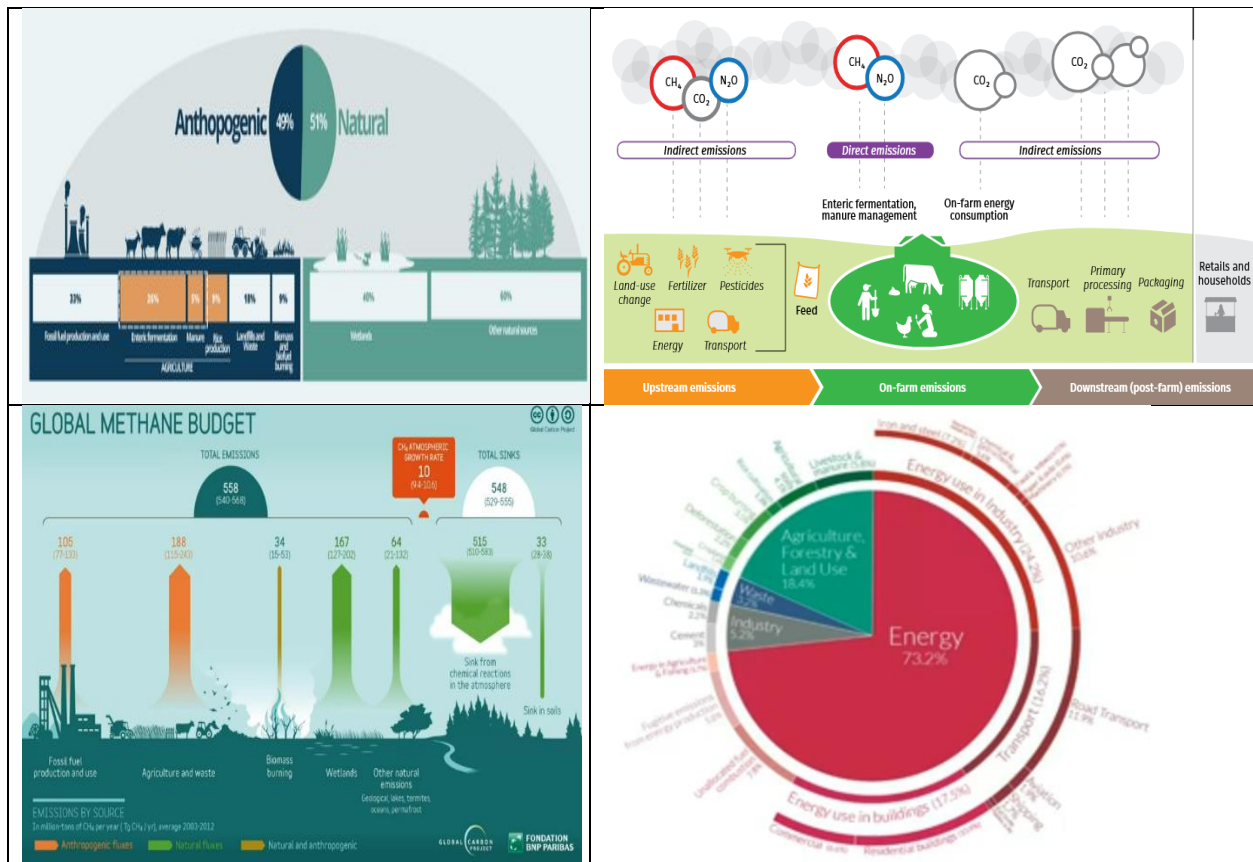
La captura de carbono o reducción de CO₂ equivalente para el 2050 será establecido permanentemente, como algo nunca visto en el sector energético, transporte, agrícola, urbano e industria. Aplica para todo el mundo y actividad.

IMPLICACIONES DEL CALENTAMIENTO GLOBAL

El impacto verdadero es que la aplicación sea adoptada ampliamente por la ciudadanía y el sector productivo y no solo llamar la atención para resaltar el uso del registro de la patente de última generación con innovación tecnológica olvidada o impráctica. Hay que entrarle con lo que se tiene disponible. Ya no cabe la otra opción de esperar cuál podría ser la mejor tecnología y no actuar en consecuencia, al menos con una alternativa innovadora accesible a tus recursos.

De esta manera global se producirá un planeta dinámico y cambiante con nuevos desarrollos tecnológicos. Es evidente que la mano de obra es desplazada con tecnología. Hay una población creciente de habitantes día a día que requiere una economía descarbonizada apegada a un modelo sostenible de largo plazo, donde la mínima huella de carbono será más apreciada que el precio mismo del producto. Tan solo con descarbonizar y ahorrar energía, alimento, vestido en cada hogar y automóvil de forma persistente impactará el ritmo del cambio climático. No debe haber alimentos que contaminen el hábitat, desmonten la foresta y afecten el aire que respiramos.

No se pretende argumentar el calentamiento global antropocéntrico, ya que los estudios del 2010, 2014 y 2020 de cada 100 autores que señalan el inminente calentamiento global con evidencia cierta que los humanos están cambiando el clima de globo terráqueo, otros 100 investigadores reportan que no hay evidencias científicas para hacer un cambio radical en la toma de decisiones o si durante este período de ondas frías y cálidas se realiza un ciclo natural de cambios para una nueva era glaciaria. ¿Qué opción tiene la razón justificada?



La naturaleza por si sola tiene proceso de respiración, descomposición, regeneración, captura y ciclos del carbono y nitrógeno. Las actividades humanas antropogénicas para el cultivo de alimentos, cría de animales y procesos industriales, alteran el equilibrio atmosférico. Para controlar los excedentes de contaminación que induce el calentamiento global es necesario conocer el origen y cantidades precisas de las emisiones que aumentan la composición química del aire. El sector energético es el máximo contribuyente y le sigue la producción de alimentos.

Lo que no está a discusión son los señalamientos de fotografía espacial que resaltan la acumulación de gases contaminantes en todos los rincones del mundo y el buen sentido común nos lleva a lograr objetivos en beneficio propio y que debemos evitar crecer la huella de carbono, que ha nada bueno nos conduce. Los nuevos satélites monitorean sobre la contaminación SENTINEL-5, CO2MVS, CO2M. En Europa el programa espacial Copérnico. Las alegatas de quién tiene la razón son especulativas. Hay que actuar con sentido común.

Todos los cultivos para alimentar a la humanidad incluyendo los granos forrajeros deberán ser de bajo impacto al imprimir su huella de carbono. Al existir más animales de granja, la industria de alimentos balanceados incrementa anualmente la demanda por pasta de soya, lo que implica deforestación por nuevas superficies de cultivo, más las distancias del transporte marítimo, agregan unidades al calentamiento global.

Undigestible fraction accessible for Exogenous Protease



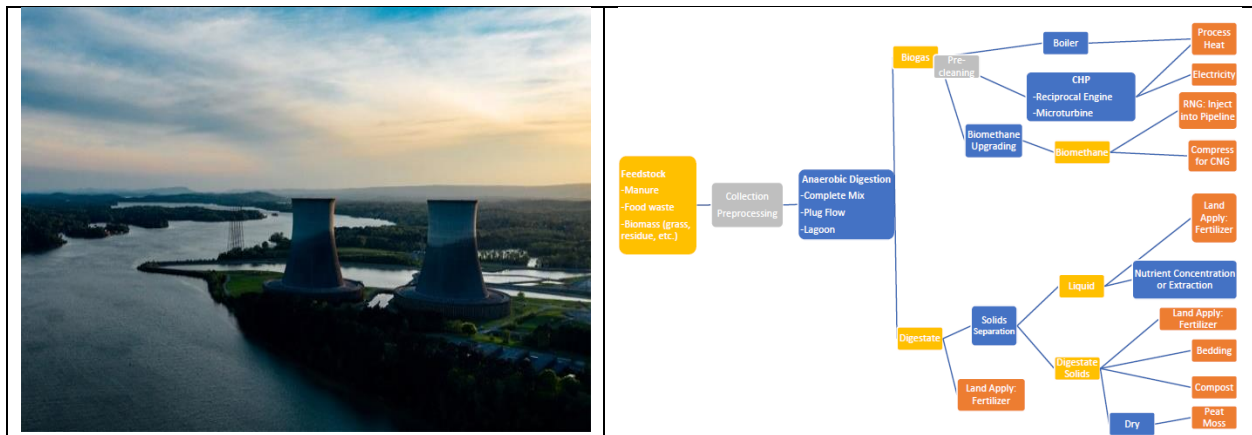
Por ello alternativas al emplear en la dieta proteasas de 2da generación mejoran la digestibilidad de la proteína. Obtener recursos como la proteína de insectos, unicelular, microalgas, proteínas modificadas por bioingeniería o cocidas en calderas de presión y temperatura para una mejor digestión y absorción, ofrecer una nutrición personalizada con inteligencia artificial acorde a las necesidades individuales de cada animal. Proveer una nutrición cinética de proteínas, fibras y almidones en perfecto aporte para lograr la máxima respuesta productiva y otros cobran importancia mundial como alternativa para sustituir las cantidades de pasta de soja en la alimentación animal. La pasta de soja es de lo mejor, pero no por ello se podrán irrumpir las corrientes húmedas para generar lluvia. Los bosques son sifones que succionan la brisa del mar.

Cultivos como maíz y papa genéticamente modificados con *Bacillus turginensis* para resistir plagas se utilizan 85% para la alimentación animal. Hay papa AmA1 que contiene 40% más proteína que una variedad de tubérculo normal. Las diferentes marcas de semilla de soja son resistentes al herbicida (roundup), a la sequía Drb2a y otros genes. Muchos cultivos GMO tienen baja huella de bióxido. Su empleo controversial está en la alimentación humana y en las moléculas residuales que tengan un efecto desconocido como sustrato a largo plazo.

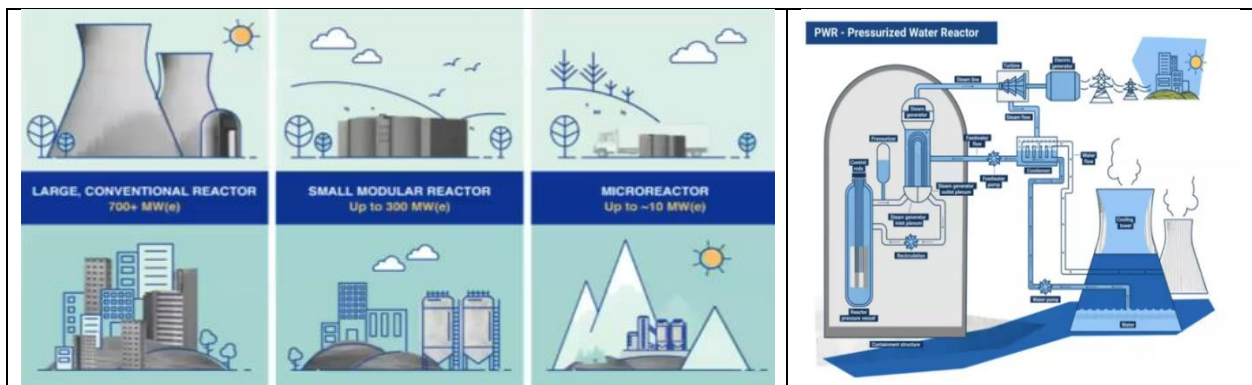
Nos debemos regir por nuevas normas éticas, estructuras financieras, educación agroecológica, una política clara para minimizar fricciones o mal entendidos. Los ajustes económicos circulares de comercialización se irán transfiriendo conforme avancen los sistemas de producción para alimentar a la humanidad y las leyes sean aplicadas con castigos económicos y cancelación de concesiones. A partir del biogás verde el mundo está legislando el futuro del planeta; su desarrollo productivo; comportamiento en los hábitos de consumo de la siguiente generación; uso eficiente de la energía limpia en casa, oficina, taller e industria; nuevas políticas económicas; cuidados del

medio ambiente y naturaleza; investigación científica, tecnológica y práctica; concientización de la sociedad civil desde la infancia y política normativa. Toda actividad productiva debe participar.

Solo 16 países cumplen el acuerdo de Paris que contiene pactos con multas. Las naciones unidas sobre el cambio climático COP 29 que incluye Azerbaiyán marcan enfáticamente el año 2024 como el principio del fin de la era de la energía fósil. Ya se oirá el rechinar de dientes en los 180 países que retrasan sus acciones para limitar sus emisiones de gases con efecto de invernadero. El resto del mundo que no está en el pacto también contribuye y se involucra. Pronto se acercan las fechas límites y compromisos incumplidos internacionalmente. ¿Cómo se actuará con las mayorías pasivas y apáticas? Algún camino se debe tomar. Compromisos son obligaciones que cumplir.



Los EUA le están apostando al uranio-235 con la instalación de reactores pequeños para ciudades medianas, ya no más plantas nucleares grandes para metrópolis y próximamente diseñando microreactores de fisión nuclear para poblaciones no industriales.

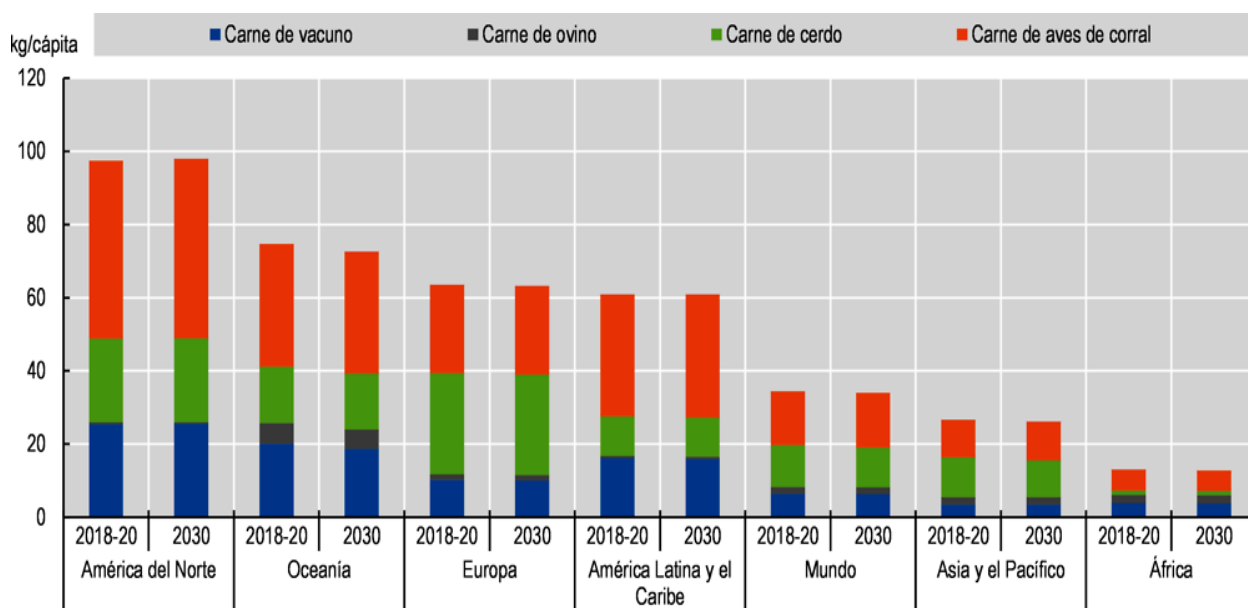


Otras alternativas: Motores de hidrógeno, vapor de agua presurizada, proceso de biogás simple, metanol azul y verde, ecotécnicas, reciclado de basura y compostas. ¿Cuál está a tu alcance?



Crece la población humana, la economía se desarrolla, aumenta la demanda por consumir carne de cerdo. Son factores deseables si mejoran la salud humana y la calidad de vida de la población. Pero también es importante conocer estrategias verdaderas de reducción de contaminantes urbanos, incluyendo la producción de alimentos, así como cuantificar verazmente sus emisiones de carbón, metano y nitrógeno equivalente y sus capturas medibles con el apoyo de tecnologías para buscar metas reales de reducción. Para este caso entender los procesos complejos de la fermentación anaeróbica, incluso la eliminación de animales muertos triturados con prácticas de bioseguridad dentro de la hidrólisis del biodigestor anóxico.

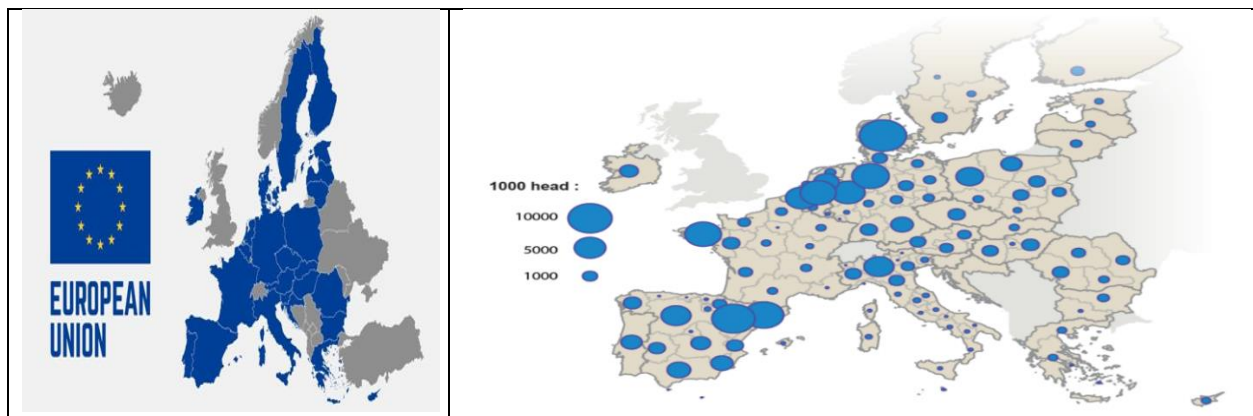
La FAO indica que las actividades pecuarias generan 18% de los gases con efecto de invernadero GEI. Son gases que atrapan la radiación infrarroja en la atmósfera y generan calentamiento de la superficie terrestre. El consumo de carne mundial le corresponde al cerdo 36%, pollo 35%, res 22%. Se puede consultar el listado del 2024 World Mega Producer. Cada vez más cerca de alcanzar los 35 lechones destetados por cerda al año.



Consumo kilogramos per cápita de carne en diferentes continentes del mundo.

En el mundo hay 650 tipos de cerdos silvestres y domésticos. Hay más de 150 clasificaciones extintas y otras 164 con alto riesgo de desaparecer. Es material genético del futuro de la producción de carne. Si bien cerdos con ingeniería genética transgénica utilizan 30% mejor el nitrógeno y fósforo de la dieta.

La Unión Europea en el 2018 produjo al mercado 270 millones de cabezas de cerdos, tiene un consumo de 40 kilos per cápita anual. Corresponden para España 30.8, Alemania 26.5, Francia 13.7, Dinamarca 12.6, Holanda 11.9, Polonia 11.1 millones de cabezas respectivamente. Registran una preferencia por los guisos con carne de cerdo Dinamarca 74, España 54, Polonia 51, Holanda 44 Kg de consumo/Habitante/año respectivamente. Considerando que un kilo de carne porcina es equivalente a 6Kg de CO₂. Otros estudios tienen rango de 2.6-6.3 Kg CO₂/Kg carne, 3.6 CO₂eq./Kg de carne de cerdo, implicando el uso de granos como alimento.



Mapa porcino miles de cabezas de países miembros de la Unión Europea

El Instituto de procesos sostenibles de la Universidad de Valladolid en España presenta un sin número de tesis y artículos para consulta IPS 2024. Las granjas en Alemania han avanzado hasta el 2022, instalando 11,000 biodigestores en casi todas las unidades de producción aportando al 25% de otras fuentes de bioenergía del país. En Europa 2015 se registran 17,400 plantas de biogás. EUA tiene un potencial de instalar 5,400 biorreactor modernos y tan solo lleva 45 unidades en funcionamiento. EUA, Japón y Alemania han desarrollado y crecido en la energía fotovoltaica más adecuada a las zonas urbanas, pero no descartan programas para los granjeros, ya que la carne de cerdo es la preferida mundialmente. Un biorreactor europeo que fermenta cultivos agrícolas produce 8 megatoneladas de energía MTOE, en granja porcina genera 6 MTOE, en China las granjas porcícolas producen 5 MTOE y utilizan 25.5 millones de hectáreas para su alimentación con grano de maíz y trigo forrajero y la importación de 23 millones de toneladas de soya provenientes de Brasil y Argentina.

En Brasil se favorece como fuente renovable la producción eléctrica con biogás sobre los sistemas solares fotovoltaicos limitados a producir energía por 12 horas al día, mientras que el biogás su proceso de fermentación es en continuo aportando energía 24/7 y solo se detiene durante el mantenimiento del equipo. Ciertamente es más fácil colocar un abanico turbina de viento, aunque los ornitólogos afirman que alteran las migraciones anuales de aves o instalar paneles fotovoltaicos solares, que construir un biodigestor que puede costar entre \$ 100 mil a \$ 5 millones de dólares y el costo del estudio técnico e ingeniería va entre \$10 mil hasta \$1 millón de dólares.

Ya se construyen granjas porcinas de 15,000 vientres instalados en una unidad de producción sitio uno SI. Hay incentivos federales permanentes para mantenimiento de la infraestructura instalada;

capacitación para mejorar la eficiencia de los biorreactores, reducir los riesgos del encargado, prevenir fallas del reactor y también la venta de bonos de carbono evitan el abandono de unidades de producción. El país de Brasil destaca mundialmente en pollo, cerdo, res y toda esta materia orgánica participa en el desarrollo de biodigestores Gonclaves 2024. Además de producir gas (calor-electricidad) se mejora la calidad del abono y se recicla agua para limpieza o riego agrícola.



Hay un Convenio mundial que se origina en 1960 sobre la Contaminación Atmosférica Transfronteriza a Gran Distancia CLRTAP firmado en Ginebra, Suiza en 1979. En México se han publicado leyes de energías renovables y sostenibles cambiando el paradigma, pero las propuestas de energías limpias no son acompañadas con el presupuesto financiero del plan anual de desarrollo de la federación e incluyentes al desarrollo y bienestar social. Se requiere mayor esfuerzo en las cámaras de representación, como en la gestión estatal. Desde 1992 la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático CMNUCC la ratifican 197 países el 21 de marzo de 1994.

La construcción de mega granjas porcinas se hace presente con la empresa Muyuan, en Nanyan, China con un complejo productivo de alta concentración animal y tecnología de primer mundo.



Para México se norman los aspectos relacionados con el ambiente, trato animal, ecología, descarga de aguas, salud humana, etc., con la Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente (LGEEPA) 1982, NOM-001-ECOL-1990 para porcinas, Ley Federal de Desechos 1991, Ley General para la prevención y Gestión Integral de los residuos (LGPGIR), Ley de Aguas Nacionales (LAN) 1991,1994, Disposiciones Aplicables en Materia de Aguas Nacionales, NOM-007-ZOO-1994, NOM-008-ZOO-1994 sacrificio industrial, NOM-001-ECOL-1996, NOM-002-ECOL-1996, Ley General de Salud (LGS), Ley Federal de Sanidad Animal (LFSA), Ley de Organizaciones Ganaderas (LOG), Ley de Desarrollo Rural Sustentable (LDRS), NOM-003-SEMARNAT 2002 para lodos y biosólidos, NOM-004-SEMARNAT-2002 desazolves de granjas, NOM-001-SEMARNAT 2021 reutilizar el agua para el riego agrícola, ISO 9001:2015 en ciclos de producción. ISO 14040-14044:2006.

Política nacional



México participa con la Ley General de Cambio Climático.

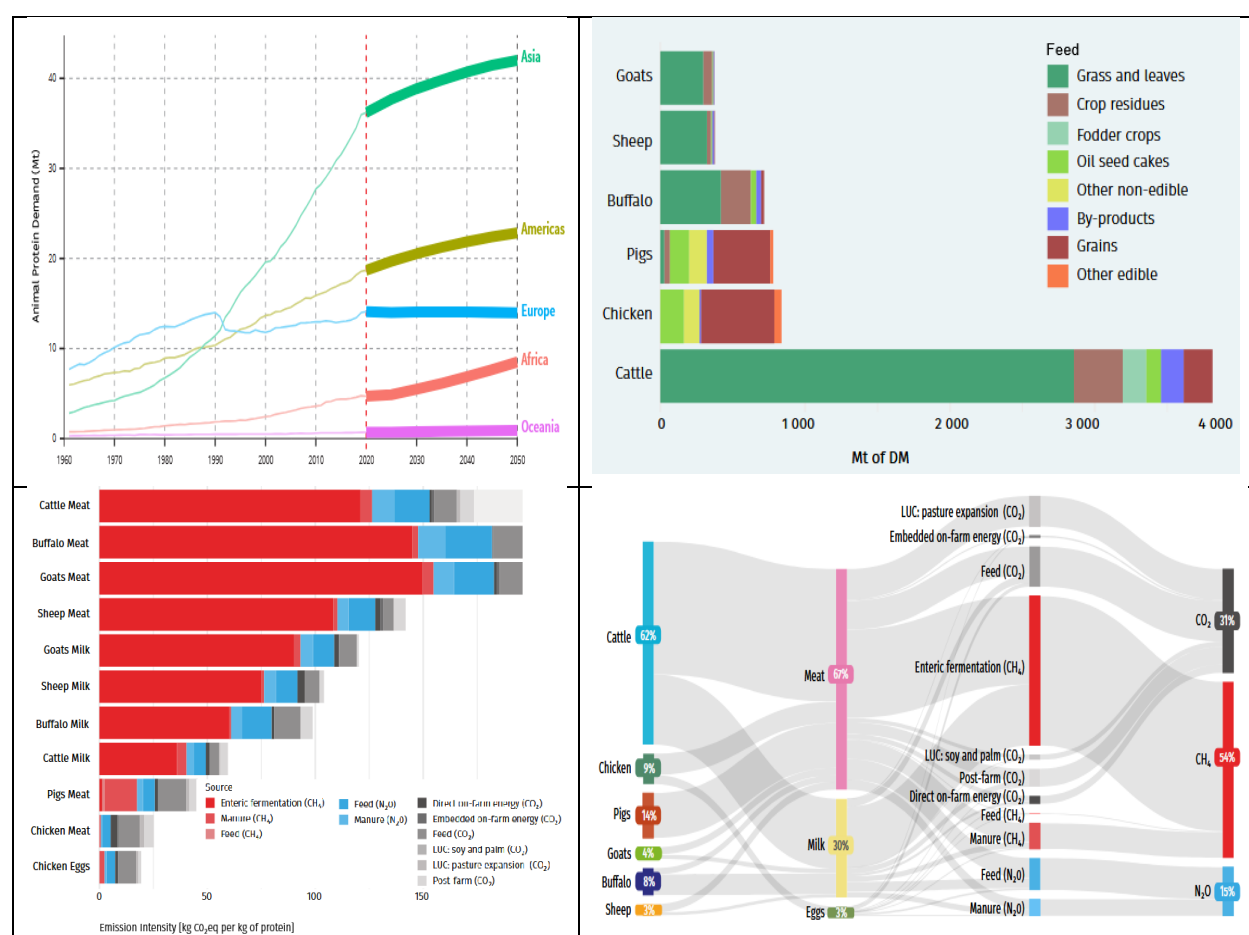
CUADRO 1 | Normas Oficiales Mexicanas en relación con aspectos ambientales.



Las empresas pueden ir más allá en el cumplimiento de las regulaciones y obtener beneficios tangibles adicionales como ambientes sin moscas, reducción de transmisión de enfermedades, mejoras en la eficiencia alimenticia, personal laboral puntual, ingreso por productos adicionales, por fuera de la venta de los animales, mejor imagen pública de la unidad de producción. Vale la pena el esfuerzo.

SISTEMAS DISPONIBLES

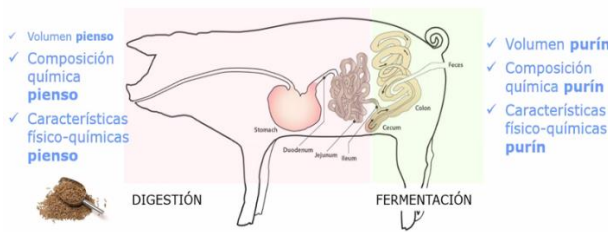
Los sistemas tecnológicos de almacenamiento de sólidos, tratamiento y alternativas con sus diferentes rendimientos para producir gas metano y con ello manejar eficientemente las evacuaciones porcinas. Los siguientes enunciados son solo valores indicativos del rendimiento y eficiencia del biorreactor.



La expansión de la aplicación de la tecnología electrónica hace evidente una mejora económica del ingreso familiar, por ello se pronostican a partir del registro histórico hasta el 2020 incremento en el consumo de cárnicos a los años venideros. Cada especie animal bajo crianza tiene preferencias en el consumo de diversas fuentes de alimento, ya sean forrajes o granos. Por su actividad ruminal fermentativa generan en su aparato digestivo gases entéricos y los monogástricos producen menos gases intestinales. Por lo que cada especie en producción de carne, leche o huevo sigue diferentes caminos para controlar las emisiones de CO₂, CH₄, N₂O y otros gases.

Alimentación y purín

Relación directa con alimentación (compleja)

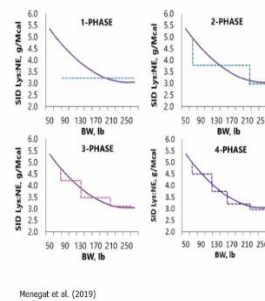


Composición química de los piensos (ingredientes), factores antinutricionales, aditivos (enzimas y otros), características de los animales (eficiencia), manejo en granja (desperdicio pienso/agua)

Canh et al. (1998); Cerisuelo et al. (2012b); Jarret et al. (2012); Antezana et al. (2015); Beccaccia et al. (2015); Philippe and Nicks (2015)

1) Reducción del volumen y excreción de nutrientes

A) Ajuste de los **aportes a las necesidades reales** de los animales:



Menegatti et al. (2019)

- Alimentación por **fases (MTD)**
- Sistemas **alimentación de precisión**
- Reducción del contenido en **PROTEÍNA** y ajuste de aminoácidos sintéticos (**MTD**)



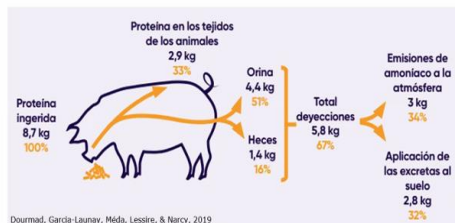
Estrategias alimentarias para reducir el impacto ambiental del purín

1) Reducción del volumen y excreción de nutrientes

A) Ajuste de los **aportes a las necesidades reales** de los animales

B) Aumento de la **digestibilidad** de los nutrientes:

- Formular con **materias primas** más digestibles
- Aumentar la **digestibilidad de las materias primas** mediante tecnología: pretratamientos y uso de enzimas
- Mejora de la **salud intestinal** de los animales: aumentar su eficiencia



Dourmeil, Gerde Launay, Méda, Lessire, & Narcy, 2019

Estrategias alimentarias para reducir el impacto ambiental del purín

1) Reducción del volumen y excreción de nutrientes

B) Aumento de la **digestibilidad** de los nutrientes:

- Formular con **materias primas** más digestibles
 - + Fibra + heces
 - Factores antinutricionales



Bagazo de cerveza



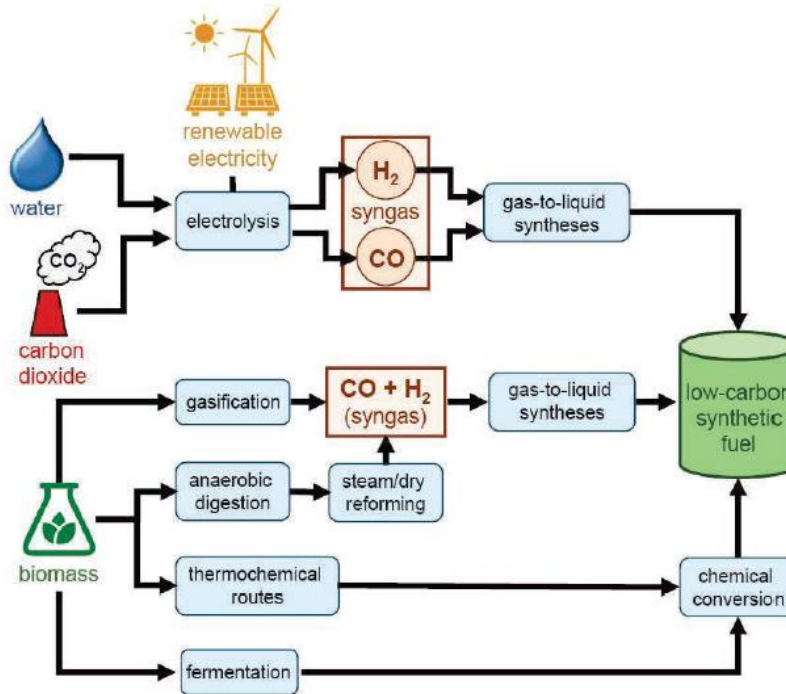
Pulpa de aceituna



Pulpa cítrica

Pexas 2023 hace el cálculo del calentamiento global en kilos de bióxido por kilo de carne, en base a energía fósil; para pollo 3.7-6.9, cerdo 3.9-10 y res 14-32 Kg CO₂ equivalentes/kg de pulpa. Con un consumo energético de mega Jules por kilo de carne; para pollo 15, cerdo 20 y res de 26 MJ/Kg de carne. Las contribuciones de bióxido de carbono por kilo de cerdo en peso vivo para Francia 2.30, Iowa EUA 3.40, Dinamarca 3.57, China 4.18 Kg CO₂/Kg de carne de cerdo en peso en pie. Para el consumo de agua se estiman litros por kilo en cerdo 6000, borrego 10400, res 15400 L H₂O/Kg de peso en pie, su crecimiento genera 3 kilos de CO₂ por kilo de incremento.

Una granja en Dinamarca con 500 cerdas produce 13,000 lechones con peso a la matanza de 112 kilos en pie. En Suecia prefieren más peso al destete y en engorda pasar en 90 días de 30 a 115 Kg. En Brasil usan leche de burra para suplementar lechones destetados ya que reduce la acción de los genes 1L1β que producen citoquina causante de una respuesta inflamatoria. Si producir alimentos es contaminante, cualquier acción en contra justifica lograr establecer una cadena neutral del CO₂ equivalente para bajar el impacto en la huella de carbono.



Un cerdo defeca a diario 4 kilos de heces, ello produce 0.33 m³ de biogás por día. Esto son entre 6 a 22 Kg de metano al año, según el sitio de crianza I, II, III, hembras de reemplazos, sementales o unidad de producción. Un cerdo que alcanza 115 kg de peso en pie ha producido 28 Kg de CO₂, algo similar a la contaminación de 10 litros de gasolina quemada. Por cada 100 m³ de un biodigestor operando por 5 días de retención hidráulica, sin que salgan los líquidos se producen 0.72 m³ de CH₄ por cada metro cubico (m³) de reactor al día. Una aproximación son 42 litros de metano por cada kilo de sustrato de sólidos por cada día. El rendimiento a 13°C será 60% comparado con una temperatura de 37°C. El biogás anaeróbico de cerdos es un combustible sostenible ya que 0.70 m³ equivalen a 1 kilowatt hora (kWh) de electricidad. Con 5 días de fermentación se fermenta el 80% de los sólidos de las heces. La capacidad del sistema de generar poder es de 4.5 kWh en electricidad por cada m³ de excretas cruda. La variación va de 1.7-9.3 Kg CO₂ eq./kg de peso en pie, pero el promedio es 3.5 Kg de CO₂ equivalente por cada kilo de peso vivo. La evaluación varía para cada Continente.

En general la entrada al biorreactor porcino de materia orgánica es entre 1.4-6.3 kilos en la demanda química calculada de oxígeno (COD) por cada metro cubico m³ diario, de nitrógeno va de 0.5-2.3 kg de N/ m³d, en la relación Carbono:Nitrógeno desde 1.9-9.4 COD* cada gramo de N. Durante el proceso hay una reducción desde 60-75% del % de materia orgánica y el N disminuye 55-89%. La mayoría del amonio se oxida en nitrito. Una granja porcina con 8,500 cabezas que alimentar, genera diariamente 1500 m³ de biogás con un potencial para producir 120 kWh de electricidad. Adicionalmente registra diariamente 15 bonos de carbono con un valor de \$15 euros por bono. El valor calorífico del biogás es de 5000 Kcal/m³ y en México se registran 721 biodigestores instalados en granjas rurales y confinadas.

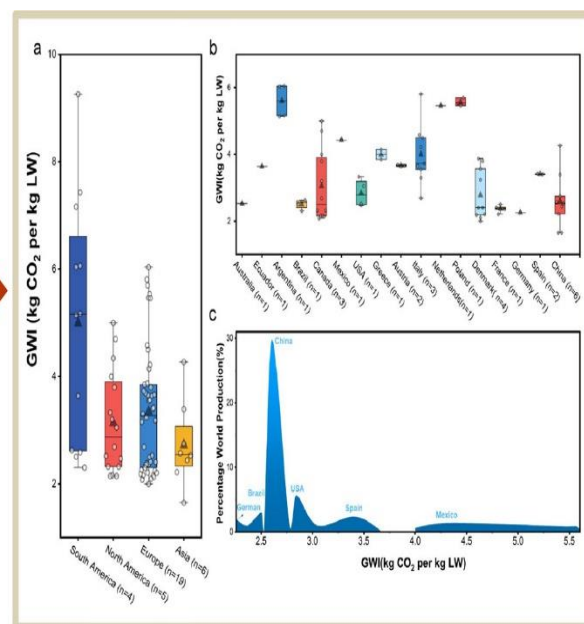
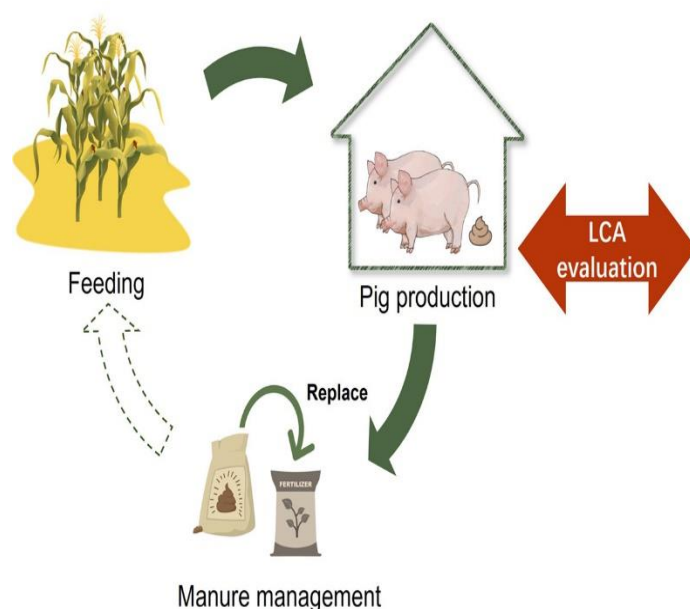


Tabla 2. Emisiones de Gases de Efect Invernadero (GEI) reportadas en la literatura en compostaje de estiércoles y biomasa bajo condiciones experimentales y métodos varios.
 Table 2. Greenhouse Gases Emission (GHG emissions) reported in the literature on composting of manure and biomass under different experimental conditions and methods.

Tipo de residuo	Características del residuo	Método de composteo	Emisiones de GEI	Referencia
Estiércol bovino y residuos de jardinería	Carbono: 48,6 % (materia seca) Nitrógeno: 0,63 % (materia seca) Humedad: 40 %; Pérdida de carbono: 70,5-77,3 %	Pilas con volteo (PV) Domo aireado (DM) kg N ₂ O en CO ₂ eq	kg CH ₄ en CO ₂ eq PV = 203,25 DM = 185,25 PV = 244,13 DM = 226,13	Friedrich y Trois (2013)
Estiércol de borrego con fracción orgánica de RSU mezclada con residuos de poda como agente de carga	Carbono: 43,3 % Materia seca: 35,5 ± 0,3 % Materia orgánica: 78 ± 2 % Nitrógeno total: 2,05 ± 0,07 %	Reactores cilíndricos: Control de oxígeno (CO) Control cíclico (CC) Control TCO (tasa de consumo de oxígeno; CTCO)	CH ₄ kg Mg ⁻¹ CO = 0,12 ± 0,02 CC = 0,25 ± 0,03 CTCO = 0,07 ± 0,01 N ₂ O kg N ₂ O Mg ⁻¹ CO = >0,0040 CC = 0,0152 ± 0,005 CTCO = 0,0094 ± 0,001	Puyuelo, Gea y Sánchez (2014)
Estiércol porcino fresco con paja de trigo y agua desionizada	Humedad: 66,16 ± 0,03 %; % % Materia orgánica: 82,49 ± 0,62 % carbono total (TC): 40,10 ± 0,32 % Nitrógeno total: 2,75 ± 0,05 % Relación (C/N): 14,57 ± 0,41 %	Reactor cilíndrico (aireación y termómetro)	CH ₄ kg CO ₂ eq t ⁻¹ MS 30_10 = 0,98 30_30 = 0,56 30_50 = 0,49 N ₂ O kg CO ₂ eq t ⁻¹ MS 30_10 = 2,78 30_30 = 1,90 30_50 = 1,52	Zeng <i>et al.</i> (2018)
Gallinaza con residuos de frutas y residuos cárnicos	Humedad 60 % % % % Carbono total: 44,9 ± 0,1 % Nitrógeno total: 5,1 ± 0,03 % Relación (C/N): 8,8 ± 0,1 % pH: 4,9 ± 0,1 %	Método de cámara estática: Composta (C) Vermicomposta (VC)	Valores para C (g kg ⁻¹ MS) 22,6 NH ₃ 2556 CO ₂ 0,13 N ₂ O 47,9 CH ₄ Valores para VC (g kg ⁻¹ MS) 15,3 NH ₃ 3758 CO ₂ 0,27 N ₂ O 46,4 CH ₄	Peng <i>et al.</i> (2019)

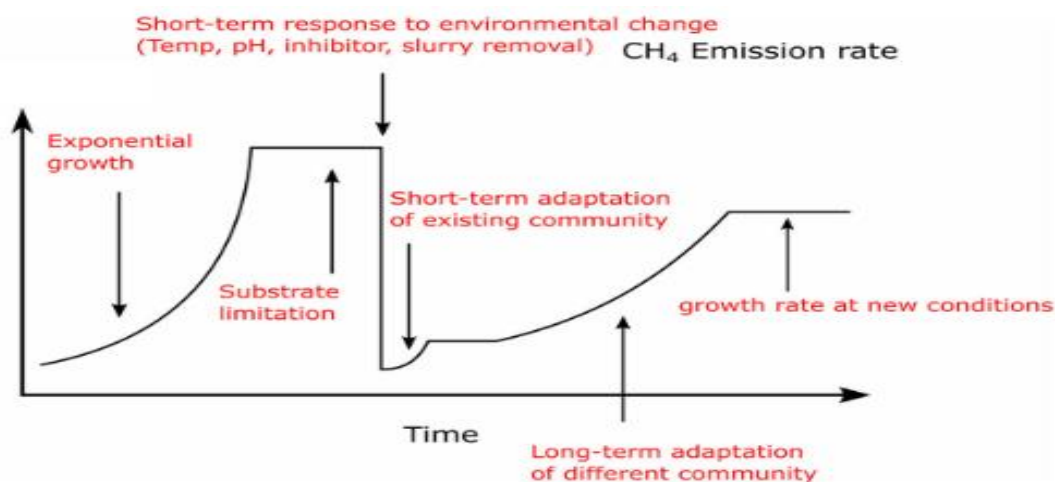
MS: Materia Seca.

Manejo aplicable a las excretas y residuos de la crianza confinada de especies domésticas para la producción de alimentos para la humanidad.

Applicability of manure management strategies to reduce methane emissions			
Manure management strategy	Manure in wet form/slurry	Manure in solid form	Grazing systems
Anaerobic digesters	+	+	-
Impermeable covers	+	-	-
Daily cleaning, collection and land spread	+	+	-
Decreasing storage time	+	+	-
Acidification	+	-	-
Biofilter/air scrubbers	+	-	-
Solid-liquid separation and/or composting (aeration)	+	+ (Composting/aeration with biochar)	-
Complete removal of manure residues between storage periods	+	-	-
Short rotation pasture management	-	-	+
Short rotation corrals/bomas	-	-	+

Note: (- not applicable, + applicable). CH₄= methane.

Hay múltiples diseños de sistemas de biorremediación. Para cantar las rancheras y enamorar a la novia hacen falta varias canciones. La tecnología más eficiente se elige para cada granja, no hay un chaleco que calce por igual a todas las unidades de producción. <https://lpeic.org/types-of-anaerobic-digesters/> . Para construcción <https://www.epa.gov/agstar> . El rendimiento final de producción de gas metano estará controlado por la temperatura ambiental y el manejo zootécnico al interior de la granja. Si la temperatura es mayor de 22°C se incrementa la producción de metano, favoreciendo poblaciones de Methylotrópica metanogénesis, la cual produce 4 moléculas y la Hydrogenotrópica metanogénesis 2 moléculas, la Acetoclastica metanogénesis una molécula. Dependiendo de la calidad del inóculo será la eficiencia para generar biogás, ya que también hay poblaciones bacterianas que compiten severamente utilizando los nutrientes para metabolizar moléculas que no son precursores del metano. La calidad y madurez del inóculo inicial es determinante de la eficiencia del biorreactor para producir metano. No descartar esta práctica de aplicar líquidos de una laguna anaeróbica que tenga años procesando deyecciones porcinas. Otras sugerencias de manejo descritas en Feuchter 2023 y 2024 sobre gas metano porcino.



El calentar las excretas por 3 días a 70°C mejora la producción de gas metano 40%, lo mismo un pretratamiento por debajo de 110°C es redituable. La producción de gas metano alcanza su máximo a los 15 días y después va bajando paulatinamente su ritmo de producción al agotarse las fuentes de alimento del medio microbiano. Por ello se sugiere una retención de líquidos de 15-30 días. La producción de biogás se favorece a los 36°C y haciendo una codigestión de 75% de excretas de cerdo con 25% de gallinaza alcanza 0.60 m³ de CH₄/Kg demanda química calculada de oxígeno (COD reducido). Un biorreactor elimina la demanda química de oxígeno (DQO) entre 80-90% y los sólidos suspendidos totales se reducen 60-75%.

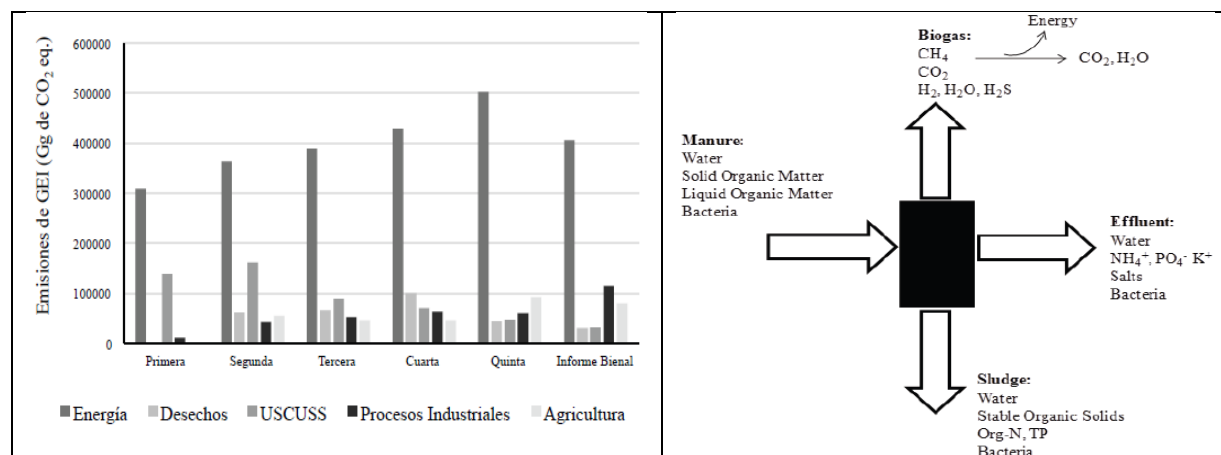
Sistema Pasivo. - El gas recuperado se agrega como componente a un tratamiento existente.

Sistema de Bajo Rango. – La entrada de excremento al digestor es la fuente principal de alimento para los microorganismos formadores de metano.

Sistema de Alto Rango. – Los microorganismos fermentadores de CH₄ son retenidos en el digestor para incrementar la eficiencia. Ya es un inóculo con especies y poblaciones adaptadas.



Dos de los rastros más grandes del mundo en Brasil y EUA.



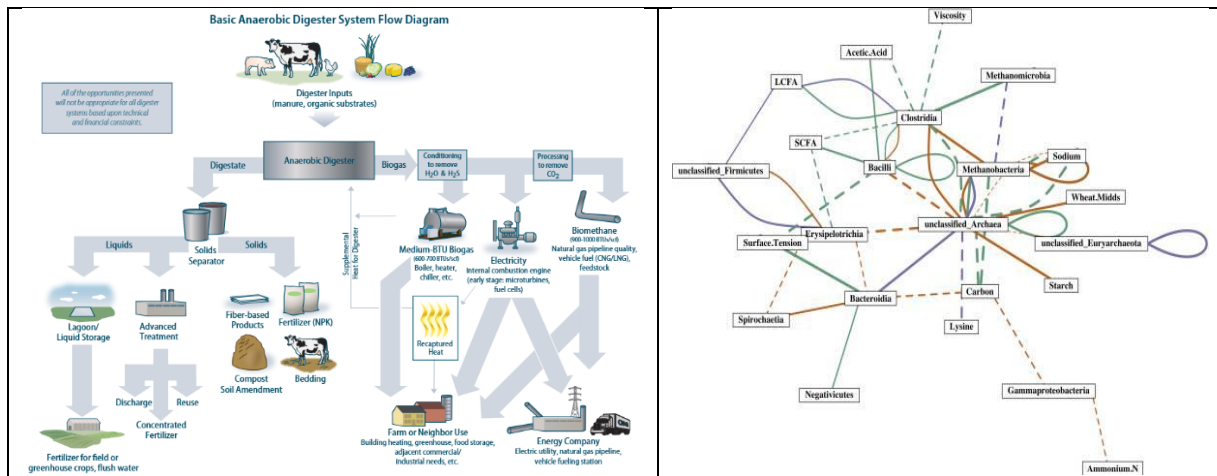
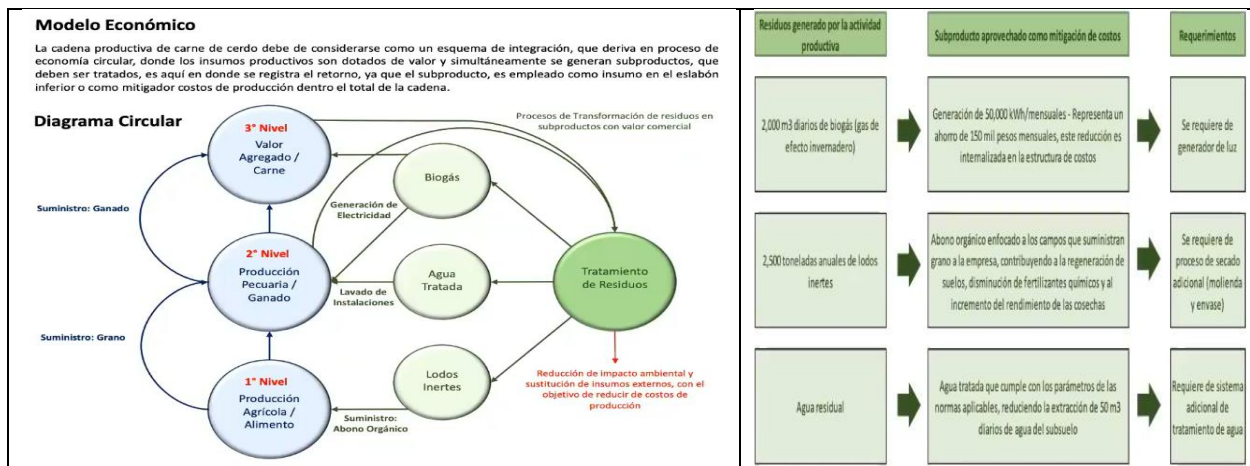


Diagrama básico representativo de la transformación de las excretas para producir energía y materia orgánica. Diagrama esquemático con la entrada de excretas y la salida de productos como gas, líquidos y sólidos.

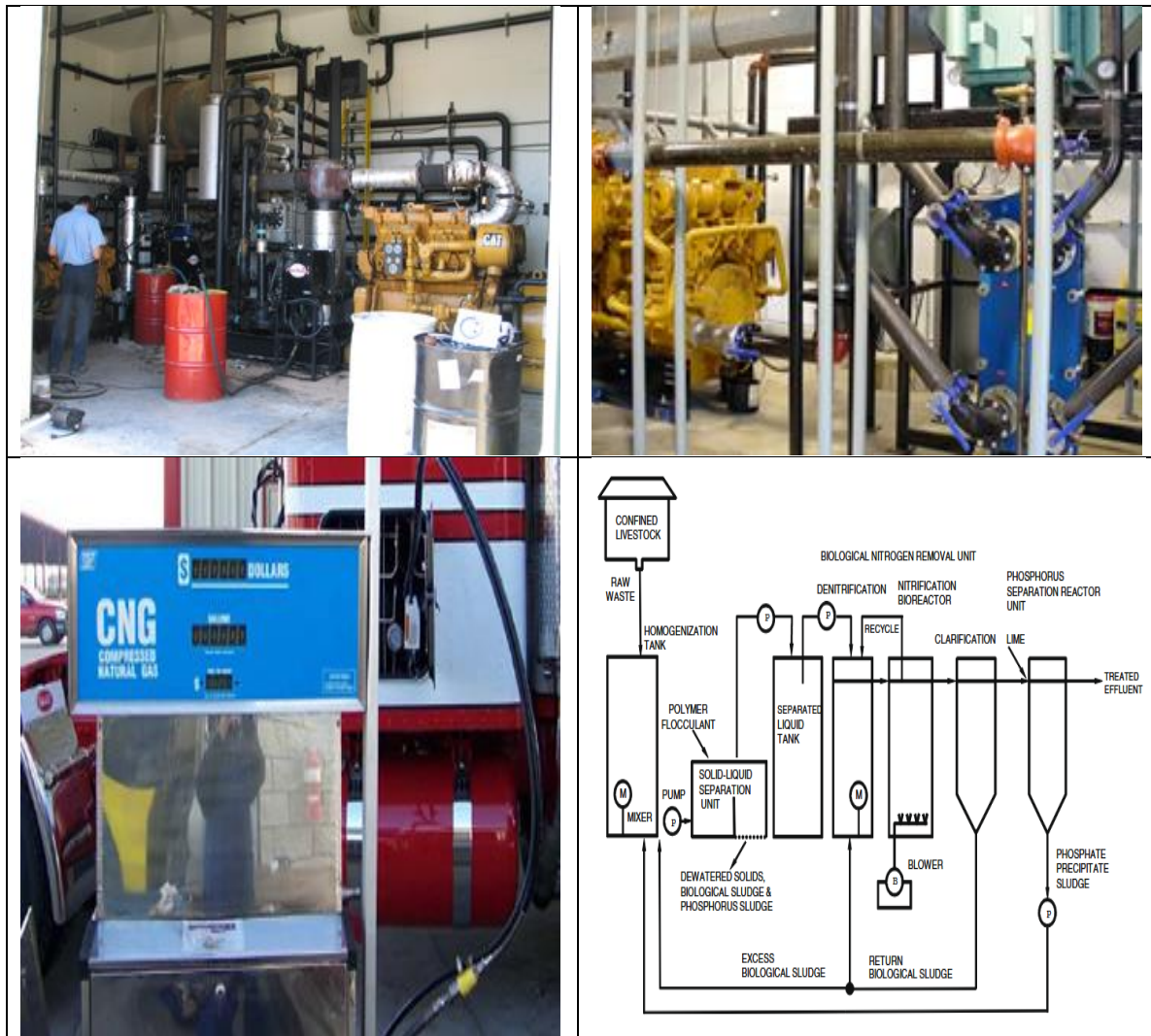
Reportes de México 1era 1997, 2da 2001, 3ra 2006, 4ta 2009, 5ta 2012, Informe bienal 2015. USCUS uso del suelo, cambio de uso el suelo y silvicultura. las emisiones nacionales de México en agricultura es el 6.4% del total, el sector energía es el mayor causante de GEI y CO₂ equivalente. Para las actividades porcinas hay un modelo dirigido de tres niveles que mediante el aprovechamiento circular integra ingresos adicionales a la granja.



En la digestión anaeróbica el medio microbiano usa como alimento las excretas sólidas de porcinos, hay un gran grupo de Archea metanogénicas interactuando en la fermentación junto a diversos micoorganismos y bacterias facultativas, primero generado excreciones de diferentes metabolitos, unos compuestos activan el crecimiento poblacional y sucesión de otra especie, hasta transformar 90% de la materia orgánica en biometano.

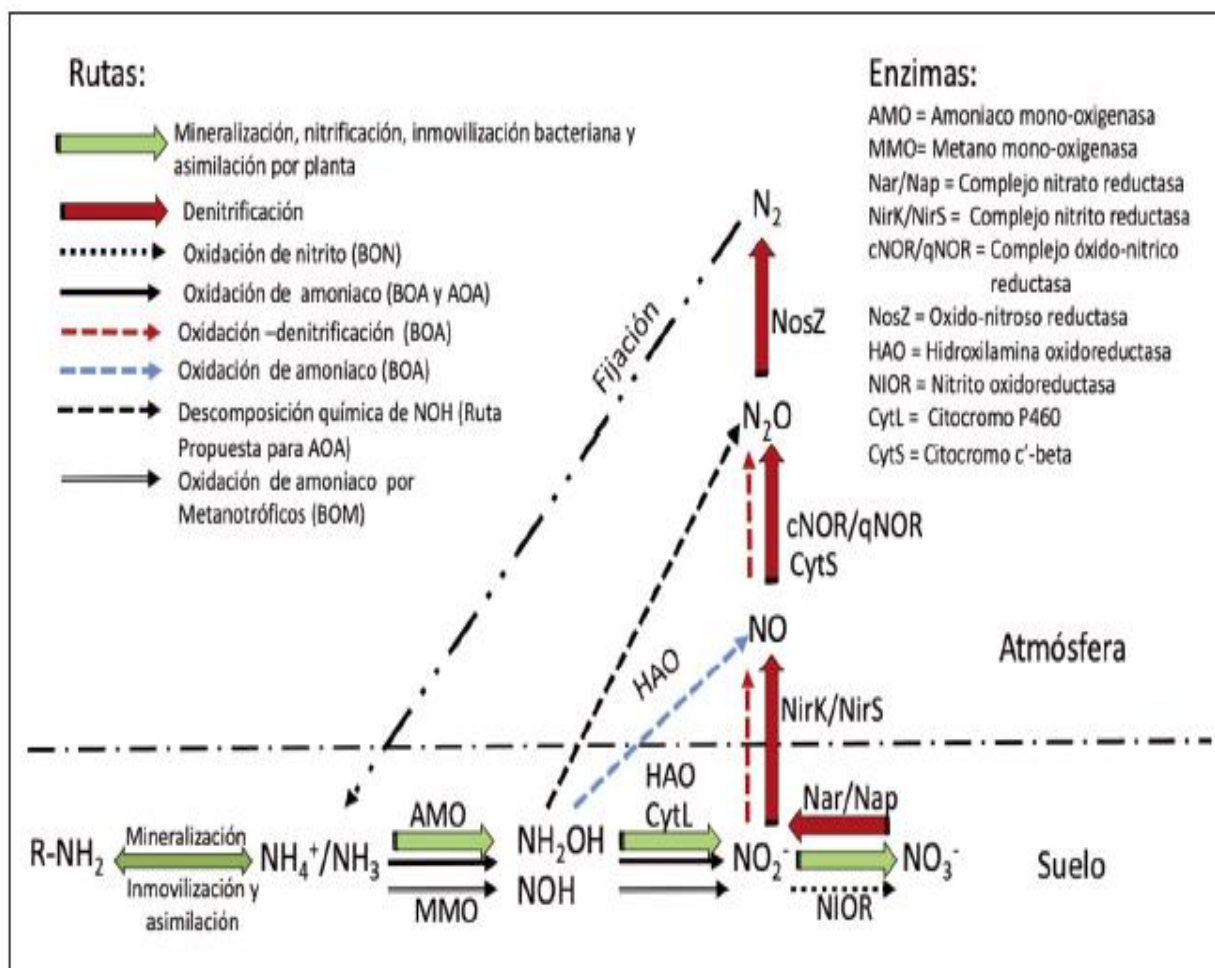


Antorcha o mechero para quemar el gas metano. Flama producida con el biogás. Se libera CO_2 quemado en lugar de CH_4 . No se aprovecha el biogás para transformarlo en electricidad u otra fuente de energía aprovechable.



Motor de combustión generador de gas a electricidad. Del escape del motor, el intercambiador de calor usa la energía calórica para enfriar un tanque. Al gas sobrante se le reduce su volumen con un compresor para ser usado como combustible de vehículos terrestres. Esquema de 2da generación sin laguna, separación de sólidos, proceso de nitrificación-desnitrificación, remoción de fósforo y desinfección.

SISTEMAS DE REACTORES ANAERÓBICOS CON SECUENCIA EN TANDAS.



Cálculo para las emisiones anuales. Con tablas y valores.

https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/gp/bgp/4_3_CH4_Animal_Manure.pdf

i.- Tipo de animal

j.- Sistema anual

$$CH_4^i = \sum_j B_o^i \cdot \overline{VS_i} \cdot MS\%_{ij} \cdot MCF_j$$

$$\overline{VS_i} = N_i \cdot \overline{vsi}$$

CH₄.- Producción de gas metano m³ por año.

B_o.- Potencial biodegradable en m³ CH₄/Kg VS (sólidos volátiles)

MCF.- Factor de conversión a metano (%).

MS%.- Sistema empleado para el manejo de las excretas (%)

VS.- Sólidos volátiles totales producidos al año Kg/año.

N.- Número de cabezas.

vsi .- Promedio anual en la producción de sólidos volátiles por cabeza (kg/CB/año)

DISEÑOS TECNOLÓGICOS DISPONIBLES PARA FERMENTAR EXCRETAS

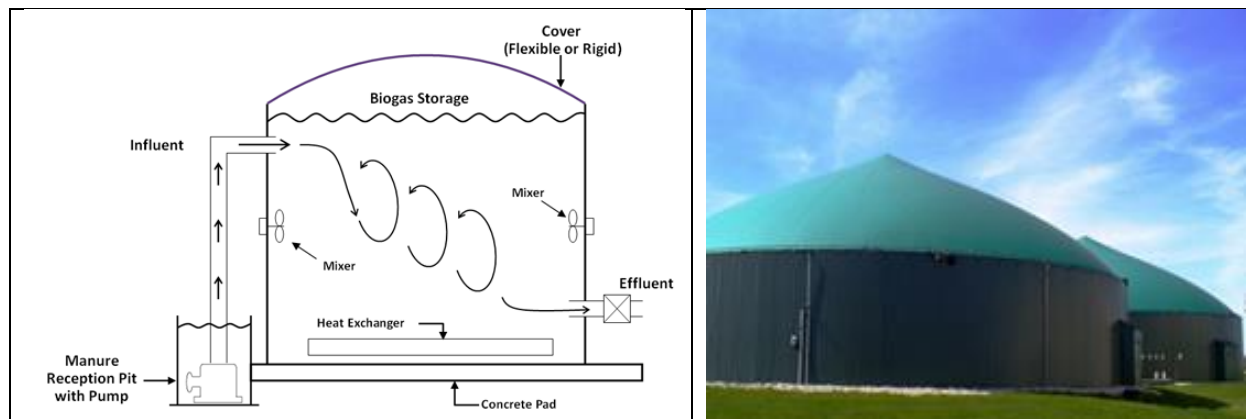
Para coleccionar y aprovechar los excrementos porcinos en confinamiento a escala agroindustrial.

<https://lpeic.org/technologies-for-anaerobic-digestion-of-flushed-swine-manure/>

HRT= Volumen del reactor/Volumen de salida diaria

SRT= Masa sólida del reactor/Masa sólida de salida diaria

La retención hidráulica es de 5-20 días. La eficiencia del proceso es variable constantemente. Los biorreactores son un ente con vida microbológica que se altera con cambios de manejo. Se dan a conocer indicadores, para dar una idea, sus valores no son fijos. Su producción es de 0.55 m³ CH₄/Kg de sólidos volátiles (VS) de la materia orgánica y la remoción de la demanda de oxígeno (COD) ha disminuido 73% a los 20 días con una temperatura entre 22-32°C y si la fermentación es por 5 días a los 22-24°C se produce gas 0.38 m³ CH₄ por kilogramo VS.

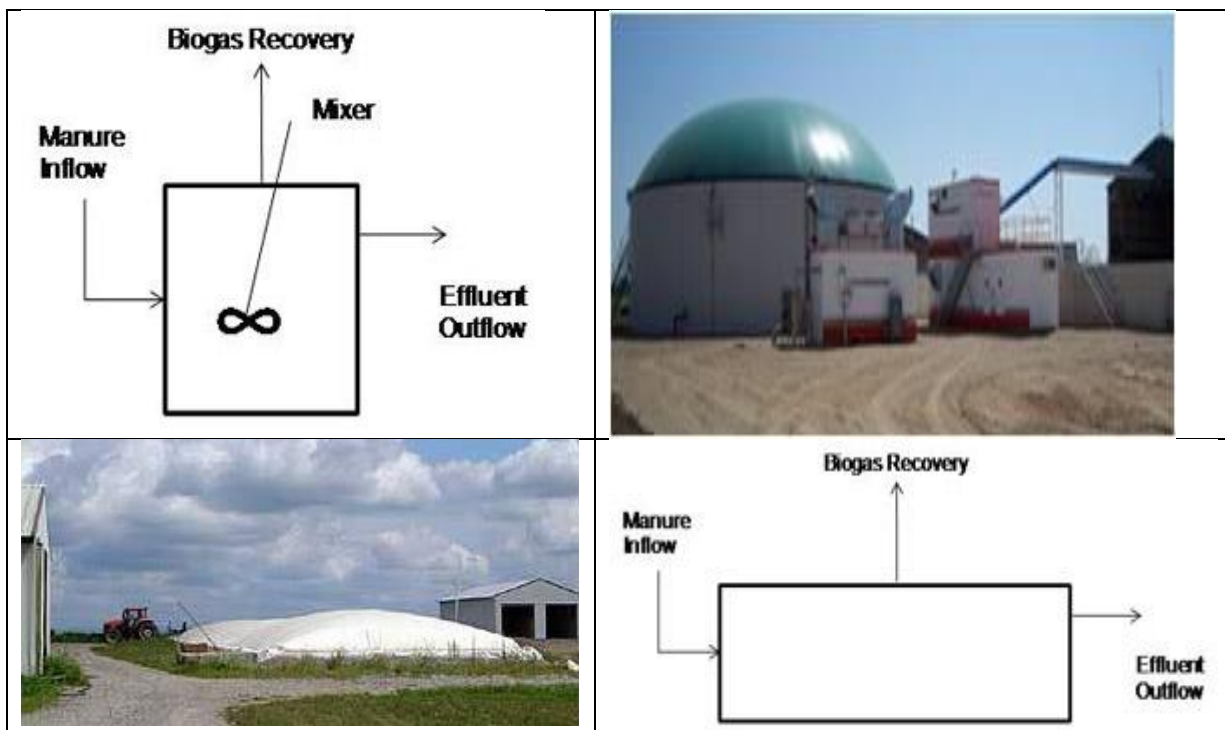




Reactor con mezclador de sólidos en suspensión. La captura de desechos está en constante movimiento. El mezclador se puede colocar desde fuera con una extensión de abanico. Se puede aplicar calor. 3% de las excretas o sólidos totales (TS) con un período de 20 días $HRT = 0.22 \text{ m}^3 \text{ CH}_4/\text{Kg}$ sólidos volátiles VS.

Se estima que una granja aporta 60 litros de excretas acarreadas por hembra por día con 1% de excretas TS.

SISTEMA BAJO DE BIODIGESTOR ANAERÓBICO $SRT = HRT$



Sistema bajo con mezclador. Sistema de bajo rango con 18 días de retención produce 0.22 m^3 de metano por kilogramo de sólidos volátiles. Sistema bajo con tapón. Diagrama de sistema bajo con tapón. Sistema de entrada, almacenaje, captura de gas y salida.

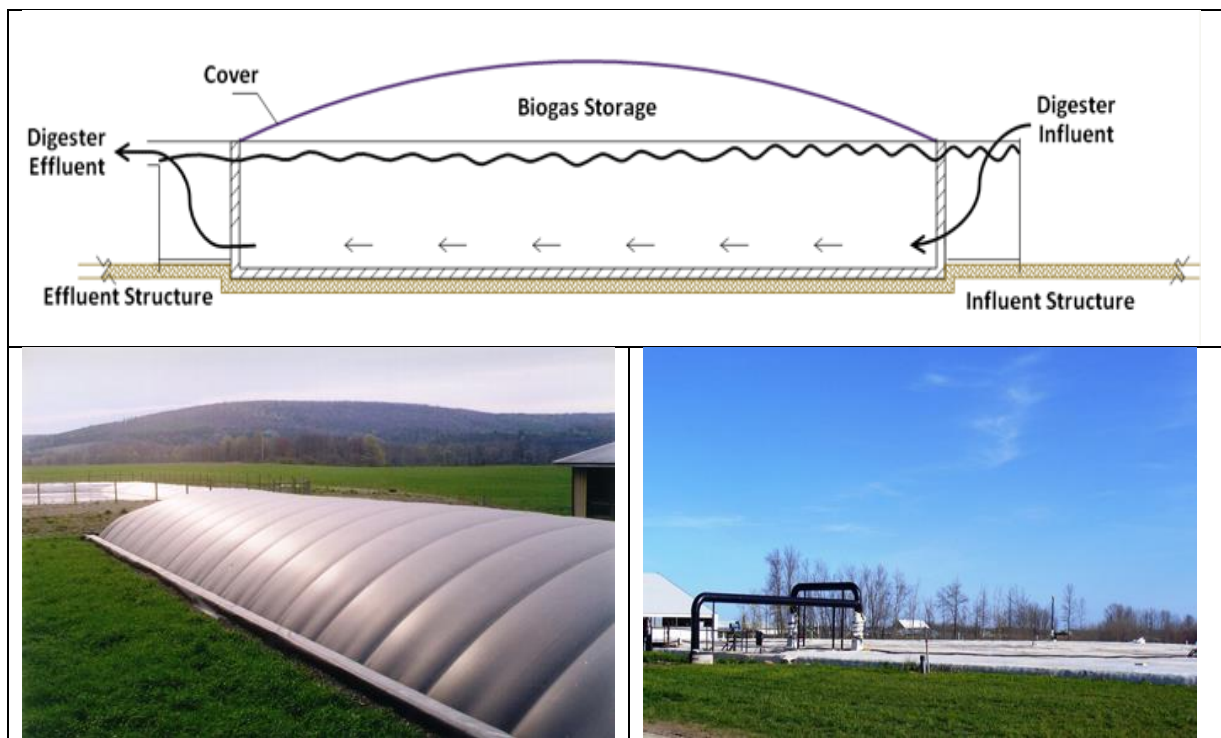


Diagrama de flujo de derecha entrada a izquierda salida. Cubierta flexible y cubierta rígida.

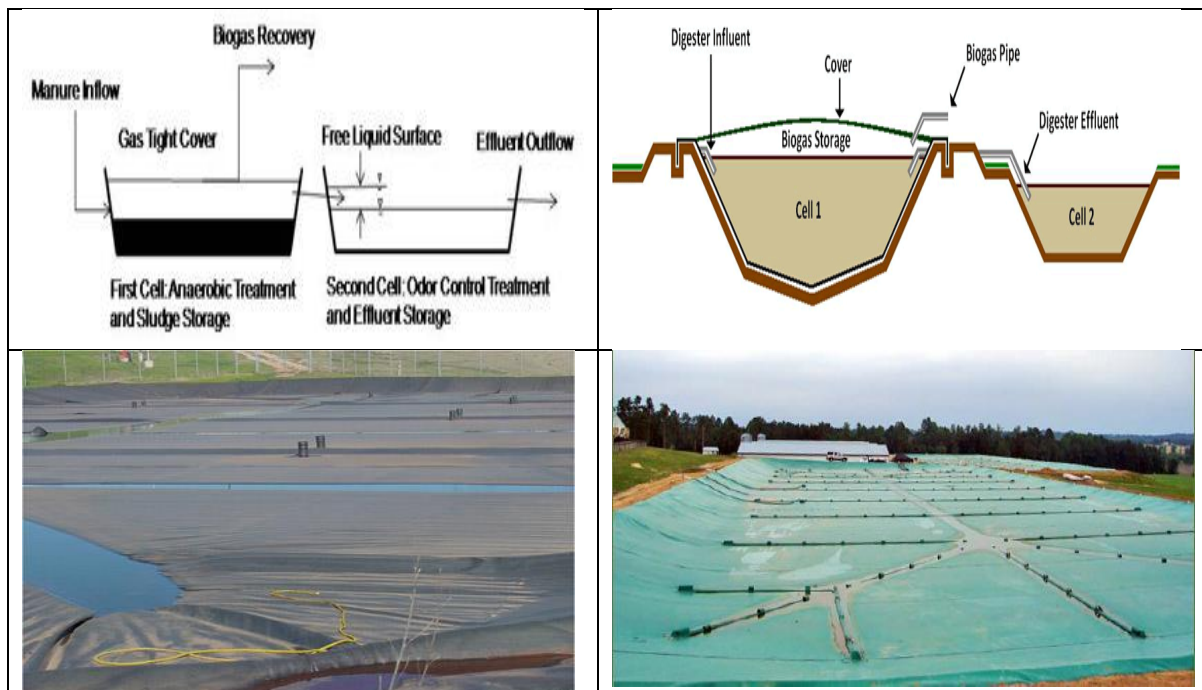
ALMACENAMIENTO DE PURINES



"..pues es de la mayor importancia que no se seque el estiércol, y que de este modo conserve su virtud....Y por esto, los cultivadores inteligentes cubren todo lo que saca de los apriscos y de los establos con zarzos de mimbres, para que no se deseque con los vientos, ni se abra con los rayos del sol":

CUBRIR LOS ESTERCOLEROS/BALSAS/DEPÓSITOS

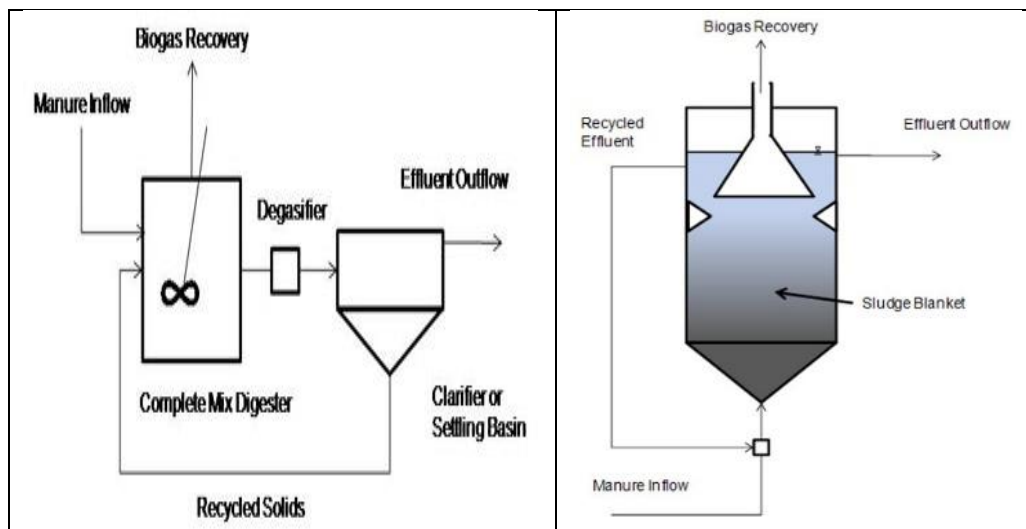
SISTEMA PASIVO

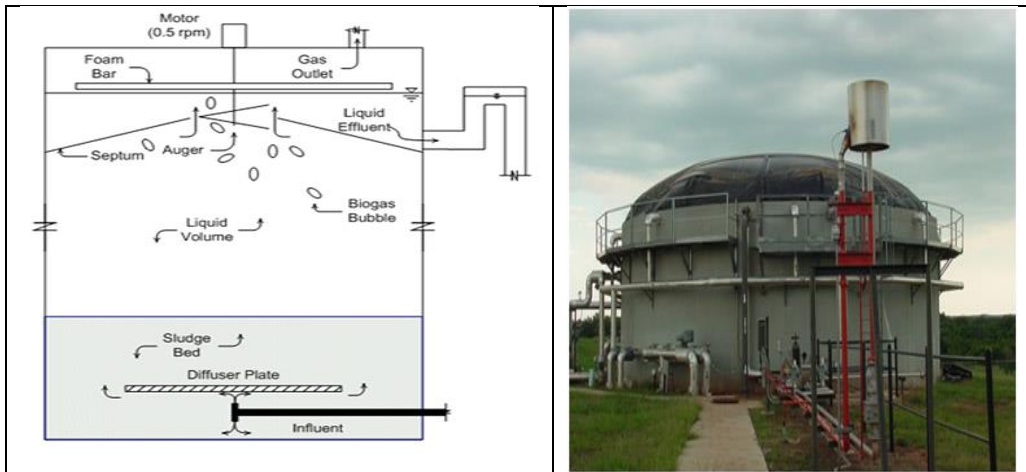


El sistema pasivo con cubierta y retención de 10 días, hay una producción de CH_4 de 0.16 m^3 por Kg VS.

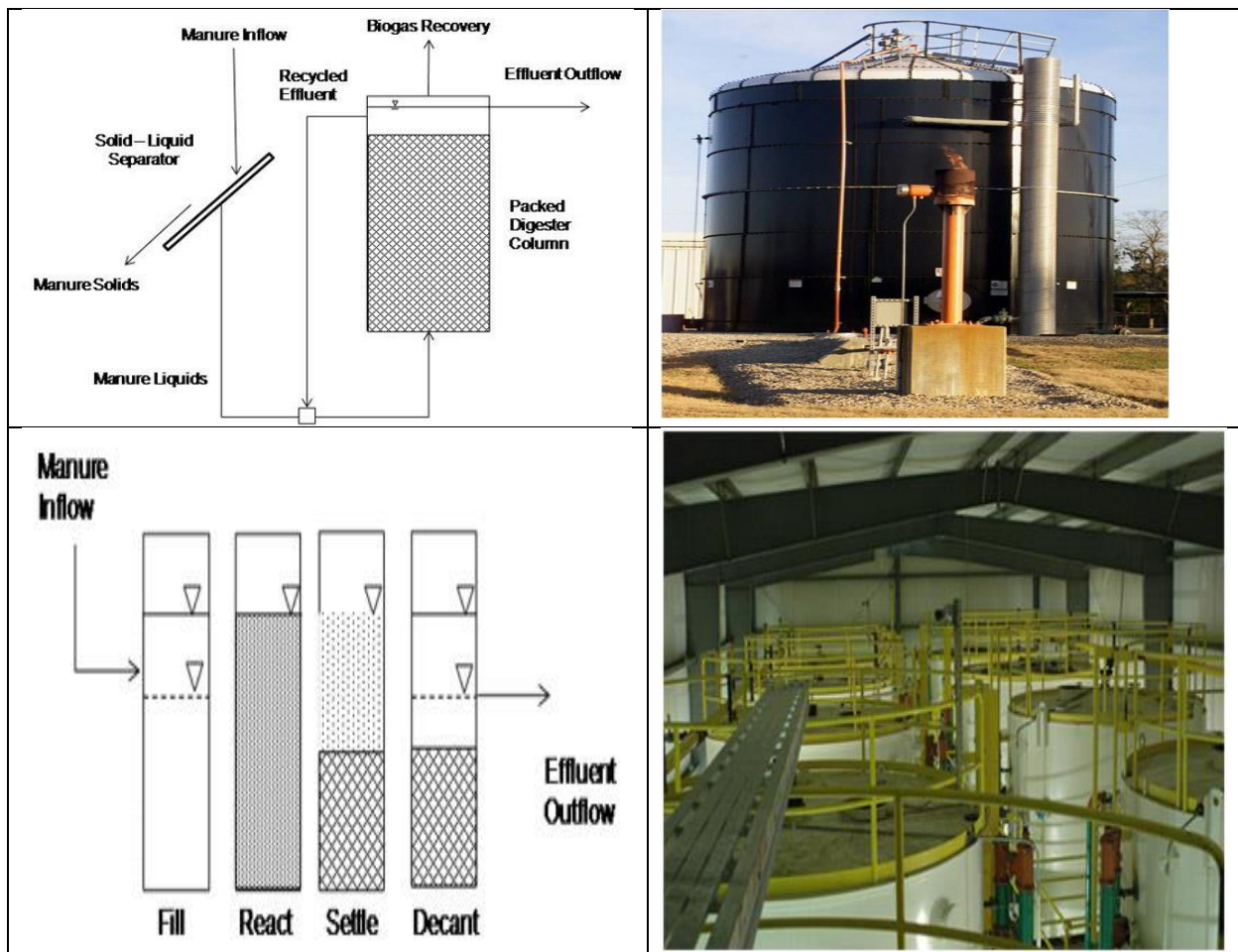
Una laguna con cubierta y digester pasivo $\text{HRT} = 60$ días, $\text{SRT} \sim 10$ años $0.16 \text{ m}^3 \text{ CH}_4/\text{Kg VS}$

DIGESTOR ANAERÓBICO CON ALTA TASA DE REACCIÓN $\text{SRT} > \text{HRT}$





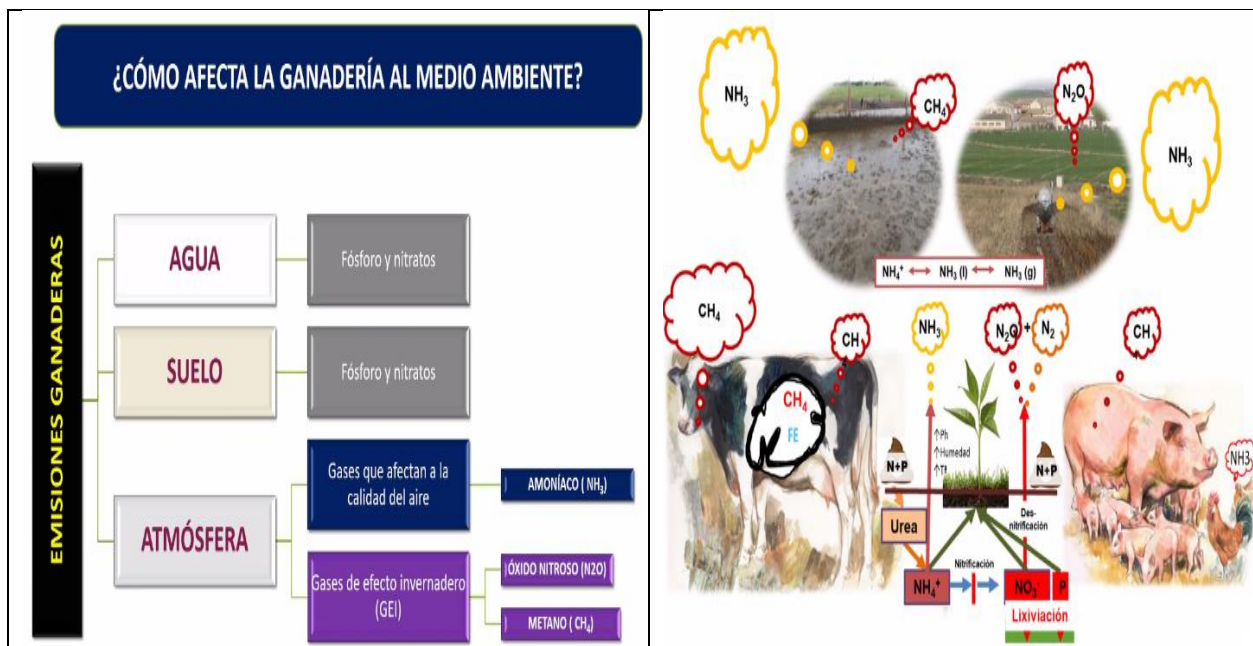
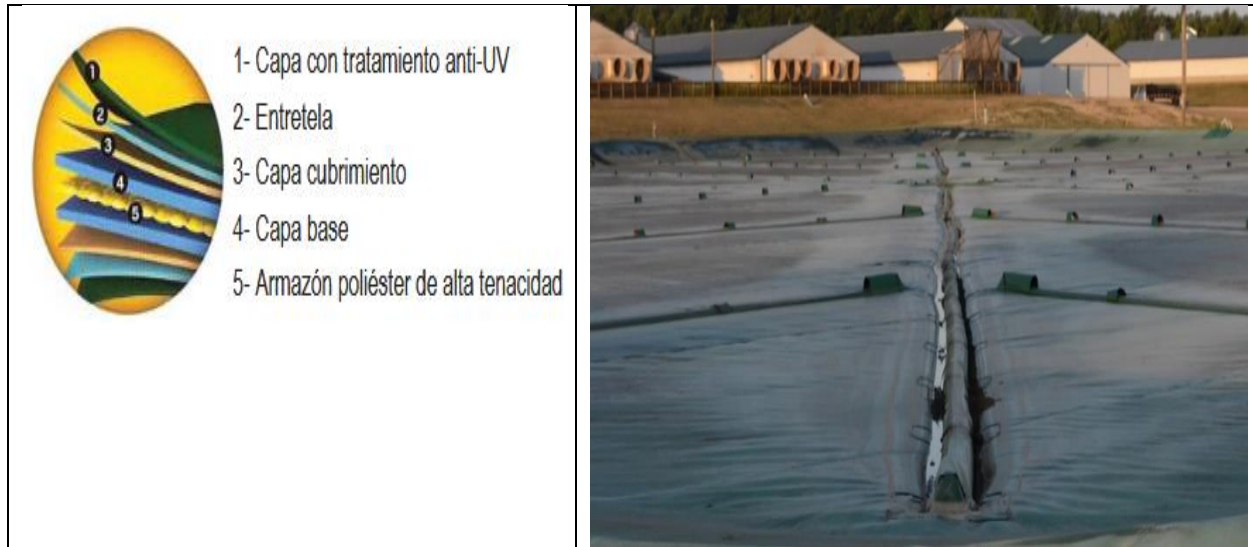
Sistema alto con mezclador. Sistema de flujo arriba y dilución de excremento en suspensión con retención de 1 día 0.50 m^3 de CH_4 por Kg de sólidos volátiles, cuando la retención hidráulica es por 5 días se generan $0.48 \text{ m}^3 \text{ CH}_4/\text{Kg VS}$. Dibujo de un Sistema reactor cama inducida. Foto Sistema anaeróbico de secuencia en lotes y su mechero.



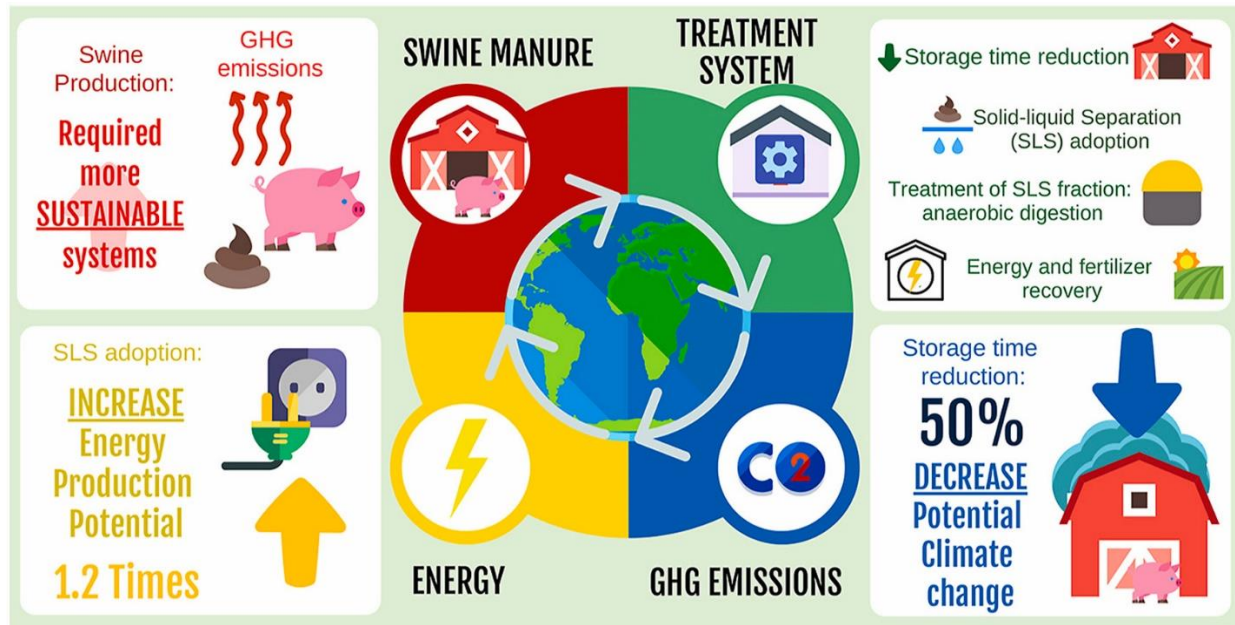
Sistema con cedazo separando excremento para diluirlo con una retención de 6 días produce $0.43 \text{ m}^3 \text{ CH}_4/\text{Kg VS}$. Sistema columna en capas. Sistema en 4 fases en secuencia de lotes con entrada

y salida de excrementos con retención HRT de 5 días $0.46 \text{ m}^3 \text{ CH}_4/\text{Kg VS}$. Sistema en batería IBR.

La construcción del biodigestor herméticamente anaeróbico como sistema de recolección de biogás con cubierta de geomembrana requiere inversión, ajustes de manejo y mantenimiento.



APROVECHAR ECONOMÍA CIRCULAR

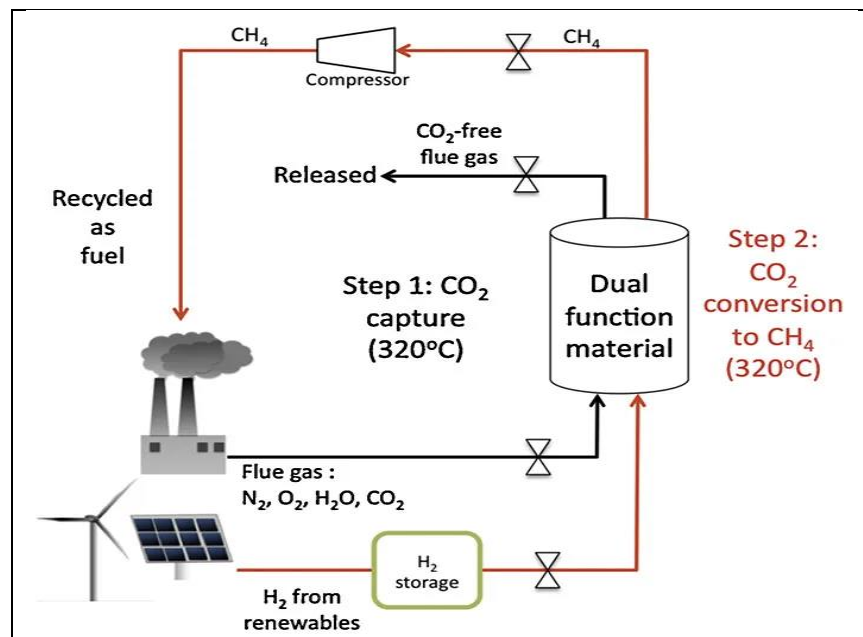


Biometano o syngás CH₄ renovable es un producto microbiológico cultivado mediante reacciones respiratorias del metabolismo de la biodegradación anaeróbica de materia orgánica de origen animal, vegetal o aguas negras urbanas. Si el tratamiento es termoquímico se denomina sintegás CH₄ (gas de síntesis) procesando materia orgánica a 700°C. No es lo mismo que gas natural CH₄ (metano, etano, propano, butano) con alto valor calorífico, denominado gas amargo de yacimientos petrolíferos; el cual, mediante plantas generadoras de electricidad de doble combinado; unos sistemas enfriados con agua y otros tan solo por aire, producen electricidad verde a bajo costo de producción, obteniendo una ventaja competitiva sobre otras alternativas para generar electricidad.

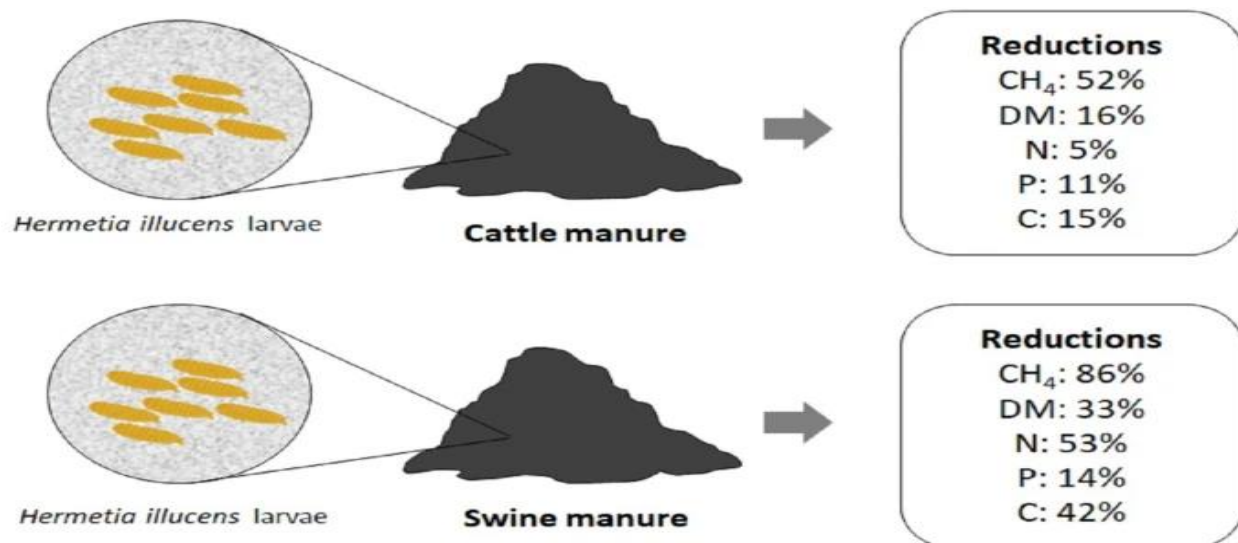


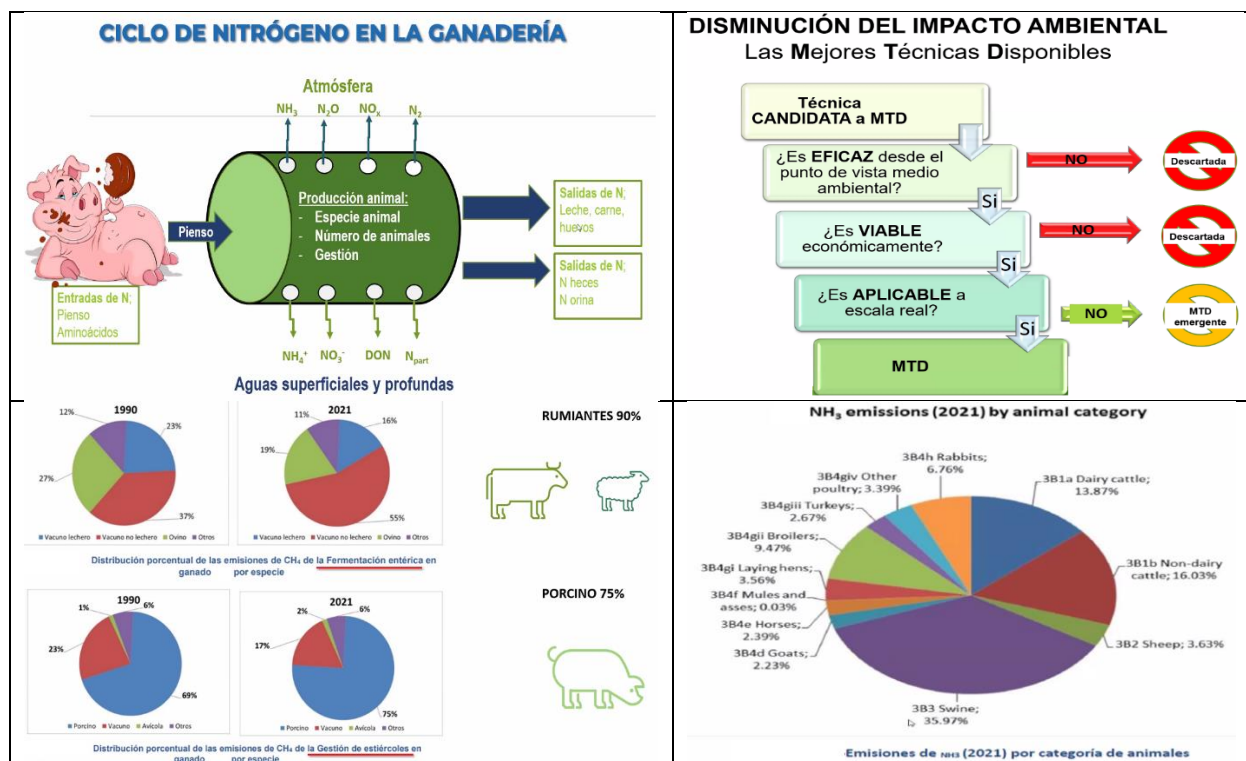
Una misma molécula con diferentes valores ambientales. El biogás siendo más amigable con el ambiente, se produce en un medio anóxico, con menor huella de carbono, podría no ser

financieramente competitivo como fuente alternativa de energía neutras contra el gas natural, eólica y fotovoltaica. La tecnología va cambiando en eficiencia y precio, mejorándose los procesos para hacer los proyectos a escala económicamente viables.



Tiene ventajas una laguna con cubierta para la degradación de la proteína y poca volatilidad del amonio NH_4^+ y amonía NH_3 , por ello muchos establos y empresas porcinas con lagunas abiertas de almacenamiento son menos estables, optando por inyectar directamente al subsuelo agrícola las excretas dos veces al año que contienen amonio NH_4^+ , aportando 1.8 de nitrógeno (N) total, 8.4% de fósforo, 0.7% de potasio, en su conjunto conforman un abono que mejora la estructura del suelo con una conductividad dS/m de 14.4.



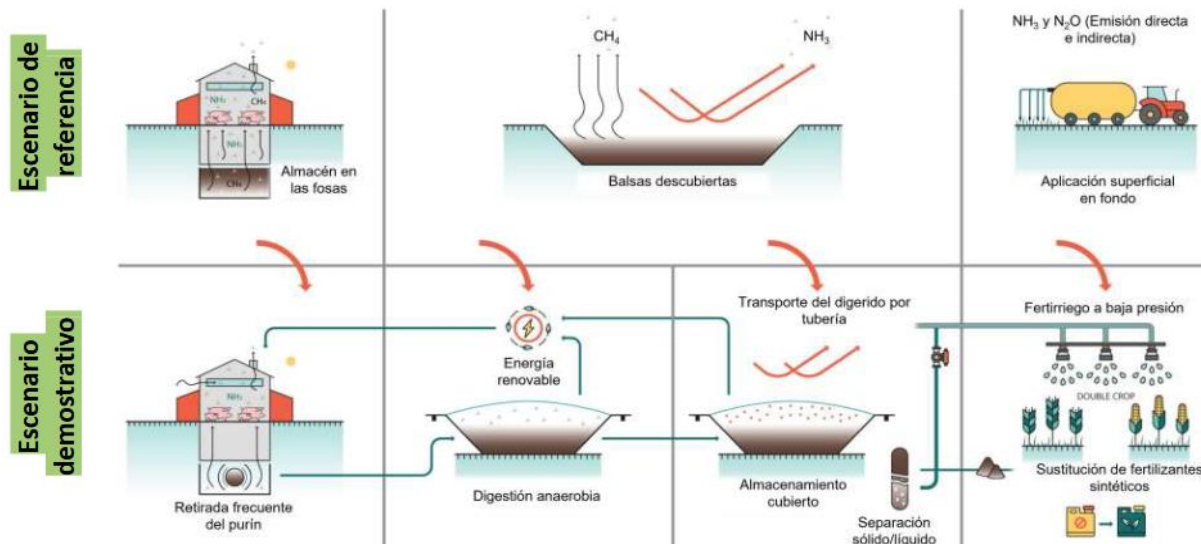


El mejoramiento de la estructura hipotéticamente crea un microambiente ideal para el desarrollo de la microbiota del suelo beneficiando las poblaciones de especies benéficas.

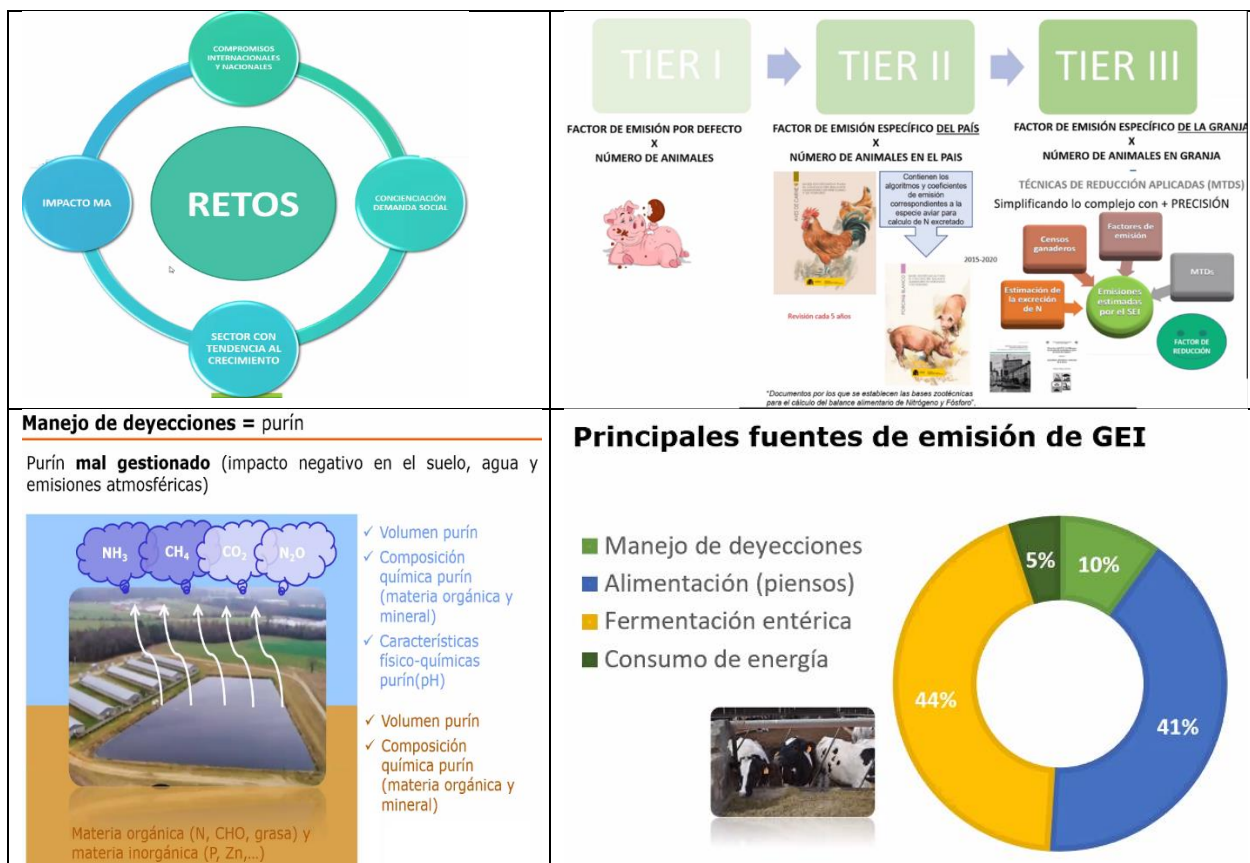
Acondicionador de suelo	Biofertilizante	Bioinsecticida, Bioacaricida, Bionematicida
<i>Bacillus subtilis</i> , <i>B. amyloliquefaciens</i> , <i>B. liqueniformis</i> , <i>B. megaterium</i> <i>B. micoides</i> , <i>Pseudomona fluorescens</i> <i>Azospirillum brasilensis</i> , <i>Azotobacter</i> spp., <i>Bacillus</i> spp. <i>Bacillus subtilis</i> , <i>Pseudomonas fluorescens</i> <i>Gluconacetobacter diazotrophicus</i> , <i>Azospirillum brasilense</i> , <i>Azotobacter</i> sp. <i>Glomus intraradices</i> , <i>Pisolithus tinctorius</i> , <i>Rhizopogon</i> , <i>amylopogon</i> , <i>R. bilosuli</i> , <i>R. fulvigleba</i> , <i>R. luteolus</i> , <i>Laccaria</i> <i>bicolor</i> , <i>L. laccata</i> , <i>Sclerotinia citrini</i> , <i>S. cepa</i> , <i>Trichoderma harzianum</i> , <i>T. reesei</i> , <i>Azospirillum brasilense</i> , <i>Azobacter chroococcum</i> , <i>Bacillus</i>	<i>Azospirillum brasiliense</i> , <i>Azotobacter chroococcum</i> , <i>Bacillus megaterium</i> , <i>Pseudomonas fluorescens</i> <i>Azospirillum brasiliense</i> , hongos micorrizicos arbusculares <i>Azospirillum brasiliense</i> <i>Azospirillum brasiliense</i> <i>Rhizobium etli</i> , <i>Glomus Intraradices</i> , <i>Azospirillum brasiliense</i> , <i>Glomus intraradices</i> , <i>Ecto micorizas</i> <i>Azospirillum brasiliense</i> <i>Azospirillum brasiliense</i> <i>Rhizobium etli</i> <i>Bacillus subtilis</i> , <i>B. megaterium</i> Hongos micorrizicos vesículo arbusculares, <i>Glomus geosporum</i> , <i>G. fasciculatum</i> , <i>G. constrictum</i> , <i>G. tortuosum</i> , <i>G. intraradices</i> , <i>Azospirillum brasiliense</i> ,	<i>Metarhizium anisopliae</i> , <i>Paecilomyces lilacinus</i> , <i>Paecilomyces fumosoroseus</i> <i>Bacillus thuringiensis</i> var. <i>Kurstaki</i> , <i>Metarhizium anisopliae</i> <i>Heterorhabditis bacteriophora</i> , <i>Paecilomyces fumosoroseus</i> <i>Hirsutella thompsonii</i> <i>Paecilomyces lilacinus</i> <i>Purpureocillium lilacinum</i> <i>Bacillus subtilis</i> , <i>Trichoderma harzianum</i> <i>Paecilomyces lilacinus</i> <i>Pochonia clamydosporea</i> <i>Ascophyllum nodosum</i> <i>Rhizobium</i> spp. <i>Bacillus</i> spp. <i>Frateuria</i>

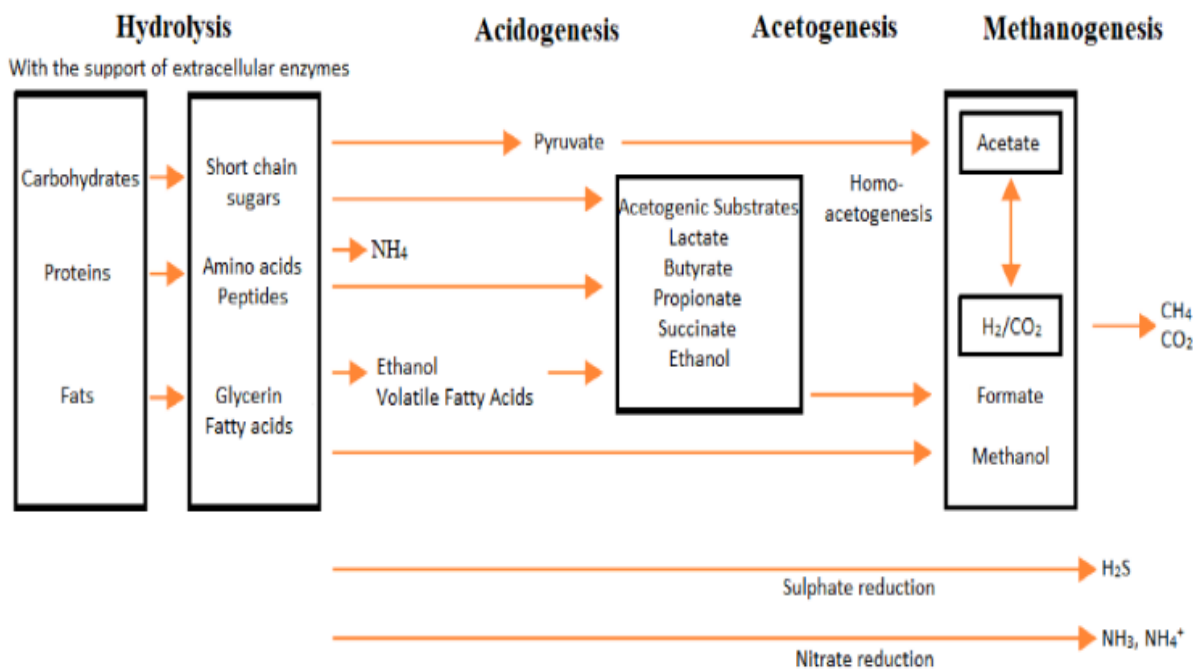
El diagrama ilustra un ciclo de agricultura inteligente y sostenible. En la parte superior, se muestra la extracción de nutrientes de los cultivos y la alimentación animal. Los residuos se reciclan como nutrientes. La biomasa se utiliza para producir biometano y energía renovable. El metano se utiliza para generar electricidad y calentar un sistema de refrigeración por absorción. El agua se trata y se reutiliza. Los nutrientes se aplican al campo, reduciendo la necesidad de fertilizantes sintéticos. El sistema también incluye un sistema de riego eficiente y un sistema de transporte por carretera.

Se usa el cincel profundo en tierra venida húmeda para impedir la volatilización del amoníaco NH_3 , al menos 30 días anticipados durante la estación previa a la siembra como alimento para incrementar la masa de los microorganismos del suelo y edafofauna. Permitir dar tiempo para que la materia orgánica de los excrementos forme parte del carbono del suelo, constituya al suelo, reduzca la erosión y pueda mineralizarse; procesos que contribuyen propiamente a la nutrición vegetal como fertilizante Zamora 2017. Los 17 elementos minerales esenciales para las plantas son C, H, N, P, K, S, Ca, Mg, Cl, B, Zn, Mn, Fe, Cu, Mo, Ni. Otros que aportan beneficios para el crecimiento Na, Si, Se, Al, Co, I. Si la inyección se realiza en tierra seca, hay una rápida volatilidad del amoníaco junto a un nitrógeno reactivo Nr en el aire como el óxido de nitrógeno NO_x y el óxido nitroso N_2O que son de mayor cuidado. Rojas 2017 las heces no se pueden dispersar inapropiadamente en las superficies de siembra sin causar externalidades ambientales por la liberación de gases con efecto de invernadero, riesgos a la salud y quejas de la sociedad por pestes. La parte líquida contiene NH_4^+ , K_2O y los sólidos concentran P_2O_5 con materia orgánica biodegradable con un humus más efectivo en su aporte de carbón y fibra para retener agua de riego. Si se asperjan encima del suelo y no se barbecha inmediatamente, muchos nutrientes se volatilizan perdiendo su valor de abono y contaminando de gases la atmósfera liberando olores fétidos al aire.



La práctica en el tratamiento de un biodigestor desde la entrada o carga del afluente al biorreactor, el ciclo anaeróbico del sustrato de biomasa como materia orgánica o heces pasa por etapas de respiración-fermentación con diversos ciclos de macrofauna edáfica diversa al proceso: Hidrólisis, acidogénesis, acetogénesis, metanogénesis.





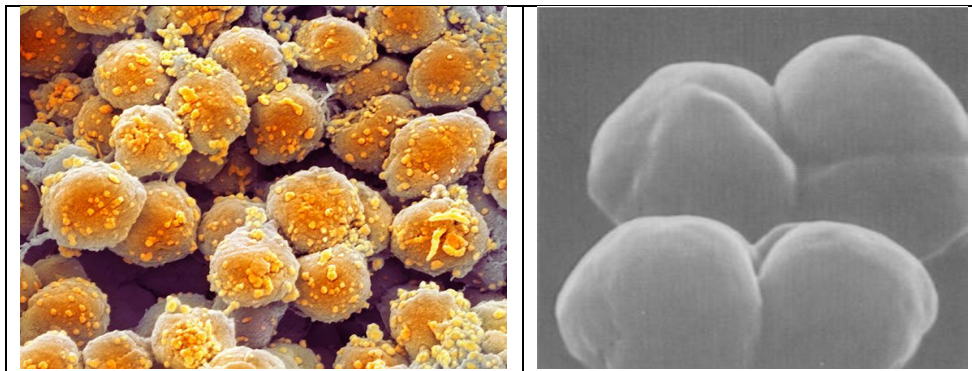
Hidrólisis: La materia orgánica compuesta inicialmente de moléculas de polímeros de cadenas grandes con alto peso molecular de proteína, polisacáridos o carbohidratos complejos y todo tipo de grasas o aceites del grupo de lípidos, se hidrolizan (degradan) o convierten por la acción enzimática microbiana durante el proceso de fermentación en sustancias más solubles o metabolitos libres como aminoácidos (AA), azúcares y ácidos grasos volátiles. Los carbohidratos se hidrolizan rápidamente en 1 día; las proteínas y lípidos en pocos días.

Acidogénesis: Las bacterias facultativas (Bacterioides, bifidobacteria, butyribrio, clostridium, lactobacillus, propionibacteria, ruminococos) ingieren las sustancias previamente hidrolizadas, siendo los nutrientes (azúcar, AA y ácidos grasos) convirtiéndolos en metabolitos de cadena corta fuera de su organismo como desechos de ácidos grasos orgánicos (AG) acético, propiónico, butírico, alcoholes, cetonas, acetato, CO_2 , H. La degradación oxidativa altera el hidrógeno y deja el carbón remanente. Los carbohidratos como glucosa se desenlazan en piruvatos, para que los lactobacilos conviertan ácido láctico, las levaduras etanol. Los ácidos grasos con acetobacteria por β -oxidación liberando acetato. Los aminoácidos con Clostridium butolinum genera CH_3 , NH_4^+ , CO_2 , H_2S .

Otros monómeros como glucosa, xilosa, aminoácidos, ácidos grasos AG de cadena larga de más de 9 carbonos se descomponen en ácidos acético CH_3COOH . Un 20% se convierte en CO_2 y H_2 y el resto en ácidos grasos de cadena corta menores a 6 carbonos. $\text{C}_6\text{H}_{10}\text{O}_5 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow 3 \text{CH}_4 + 3\text{CO}_2$ otras bacterias producen CO_2 por lo que no se presenta bien la relación 1 CH_4 :1 CO_2

Acetogénesis: Otro grupo de bacterias acetogénicas (acetoanaerobia, acetobacteria, clostridium, eubacteria, syntrophobacteria) transforman los AG de cadenas cortas en ácido fórmico, acético y alcoholes en acetato, H_2 y CO_2 . Actúan en sincronía con bacterias metanogénicas Archae y Homoacetogenicos.

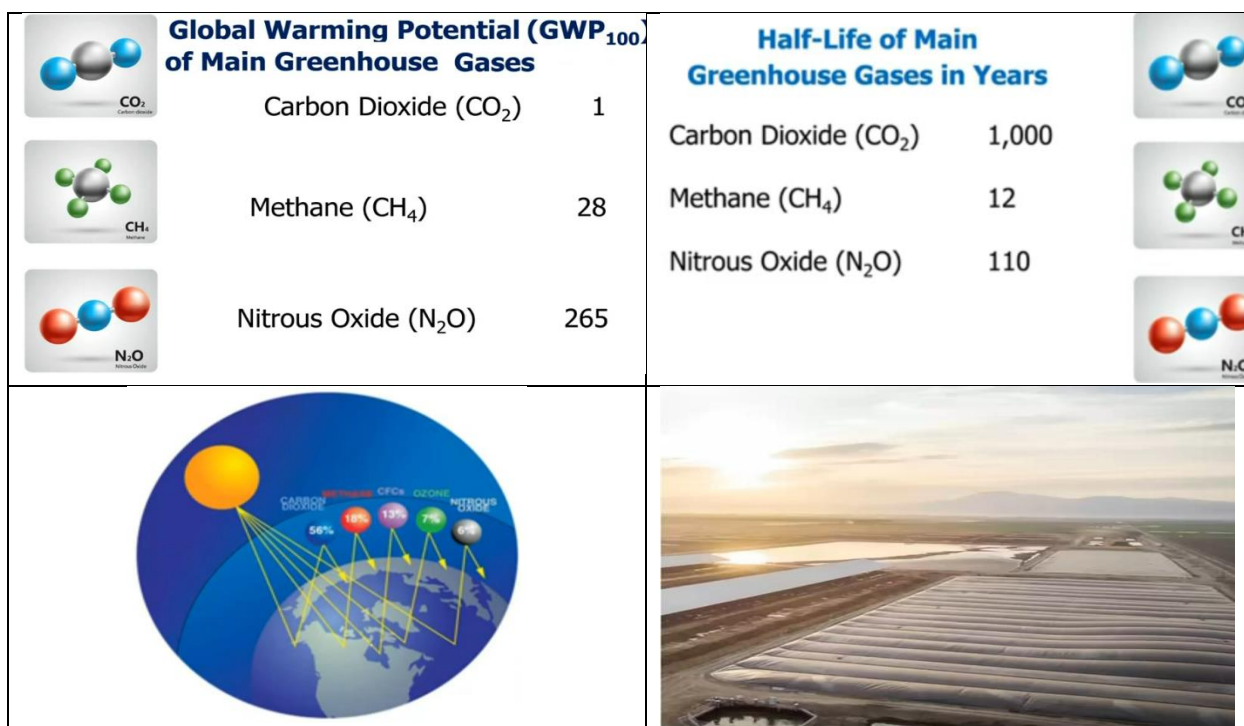
Metanogénesis. Con un medio de cultivo (Mathanothrix, Methanobacterium, Methanobrevibacter, Methanococos, Methanogenium, Methanosarcina, Methanopyri) cambiado en nuevos metabolitos las poblaciones del grupo de las Archeas forman biogás. El metano se puede producir biológicamente por bacterias eucarióticas, metanógenas acetotróficas e hidrogenotróficas. Hay que considerar que las bacterias Archea son de los primeros seres vivos unicelulares en el planeta tierra, 3500 millones de años y formadores de la atmósfera que nos rodea aceptando la vida del planeta. Están presentes en todo el mundo. En el humano y otros animales *Caenorhabditis elegans*.



Cada etapa es dominada por diferentes especies bacterianas para que sea funcional y en la descarga los digestatos de salida del efluente sean menos contaminantes con un contenido mínimo de coliformes fecales, virus, bacterias patógenas. Hay que considerar ampliamente que una laguna de retención aeróbica sin cubierta de lona, al bombear las excretas para desalojar la fosa y usar el contenido para la fertilización agrícola, se incrementa el riesgo de diseminar el virus PRRS en las granjas cercanas. Por ello un movimiento así debe hacerse cuando las granjas de cerdos están vacías.

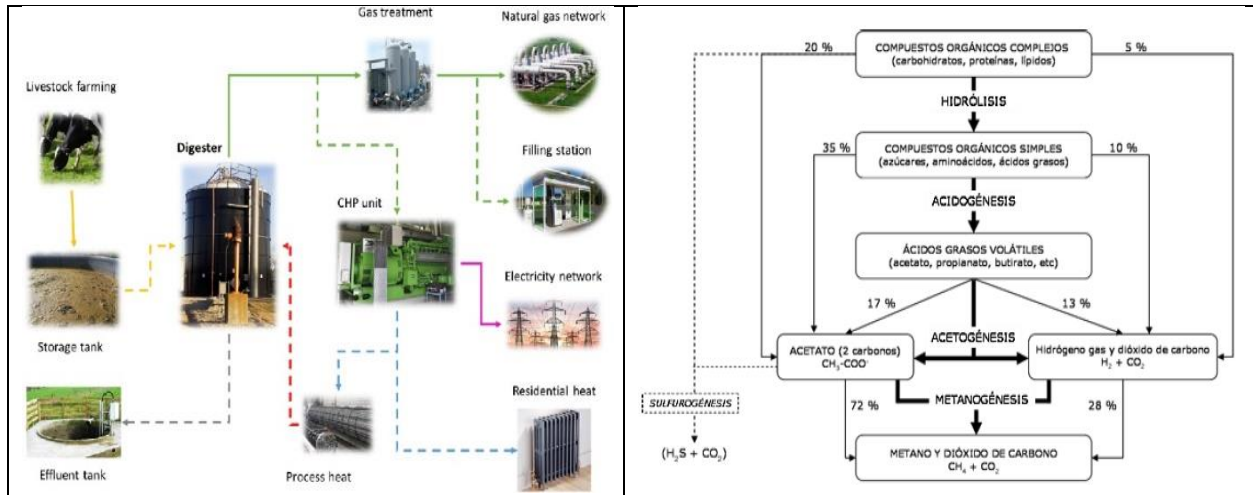
En el composteo de los sólidos, si la fase termofílica de crecimiento bacteriano con mayor biomasa celular alcanza más de $55-70^{\circ}C$ se presenta una pasteurización eliminando muchas bacterias patógenas y huevos de parásitos como helmintos. Los huevos de nemátodos porcinos *Ascaris suum* con un día en el digestor anaeróbico sobreviven solo 8% de la población inicial, pero no quedan completamente eliminados, al pasar una semana queda un remanente del 50% de los huevos sobrevivientes y a las 3 semanas todavía eclosiona el 9% de los huevos vivos. Con coliformes fecales 2.4×10^8 a la 8 se reducen con la fermentación a 1.7×10^5 al cubo. Para *Escherichia coli* inicia con 1×10^5 a la quinta (5) unidades de colonias formadas CFU, rápidamente pasan a 100 CFU por gramo, por lo que las excretas “limpias” alcanzan un valor de uso agrícola, sin riesgos para la salud humana.

El protocolo de Kioto referente a la emisión de gases con efecto de invernadero GEI: CO₂, CH₄, óxido nitroso N₂O, HS, SO₂, NH₃, ácidos grasos volátiles, Hidrofluorocarbonos HFXs, perfluorocarbonos PFCs, hexafluoruro de azufre SF. El que menos preocupa para el calentamiento atmosférico es el CO₂ que tiene una equivalencia de 1CO₂ eq., comparado con el CH₄ que son 28 kg CO₂ eq/kg de metano, con una vida de 12 años en el aire, pero aun estando en la zona troposférica se convierte en ozono O₃ y el N₂O tiene un coeficiente de 265CO₂ eq por cada kilo de óxido nitroso. Saynes 2016. Si bien el conocimiento de la ciencia, investigación, estudios académicos van avanzando en precisar las reacciones bioquímicas, metabólicas, fisiológicas del cultivo y proceso para minimizar la contaminación, hacen que los programas computacionales para reportar los valores de bióxido de carbono equivalente tengan que ser modificados y actualizados. Su precisión se da en valores transformados a unidades GWP100 potencial a cien años, ahora las unidades métricas se usa el método en GWP con 20 años.



Hay dos formas de medir la cantidad de gases con efecto de invernadero emitidos a la atmósfera por su valor en unidades de bióxido de carbono CO₂ equivalentes y la durabilidad persistente a través de los años generando calor GWP-100. Cada molécula de gas en el aire tiene la capacidad de refractar la luz solar contribuyendo al calentamiento global CO₂ 56%, CFCs 13%, ozono O₃ 7%, N₂O 6% y CH₄ 18%. Cámaras de biorreactores anaeróbicos para generar combustible de CH₄.

No se puede evitar la producción de metano, pero sí controlar los gases efecto invernadero GEI. El cálculo de la huella de carbono debe incluir los Kg de CO₂ eq por año, por cerdo y por Kg de cerdo vendido. El Programa Mexicano del Carbono PMC resalta que para las actividades agrícolas destacan en los GEI CH₄ con 52%, óxido nitroso N₂O 44% y CO₂ 4% por lo que se deben controlar.



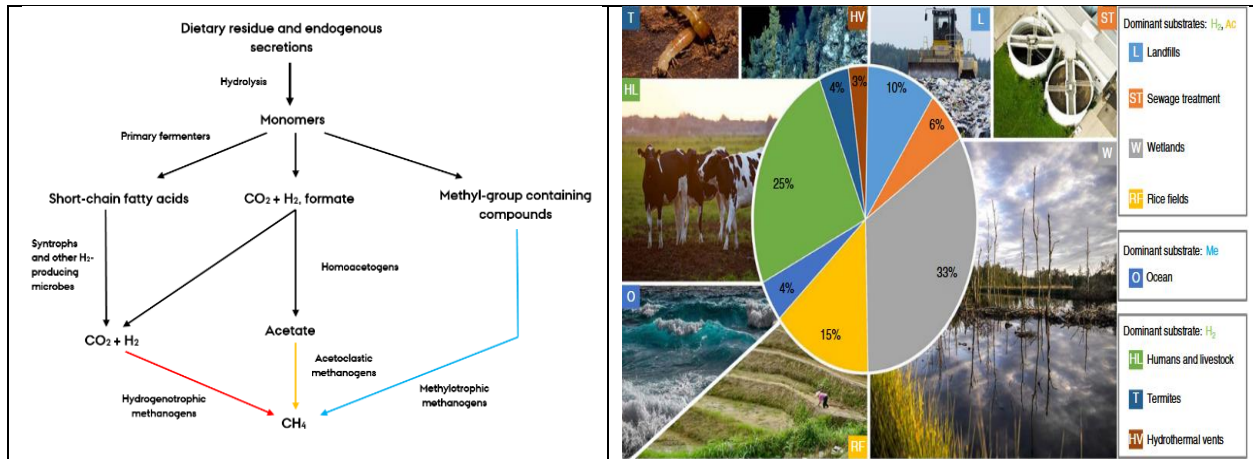
Las dimensiones de una laguna de biodigestión anaeróbica pueden medir de largo entre 20-150 metros y ancho 10 a 150 metros, con una profundidad de 1 a 5 metros.



Achinas 2020 menciona que el biogás crudo producido puede ser filtrado del 2% de impurezas como vapor, hidrógeno H_2 , nitrógeno N_2 , ácido sulfhídrico H_2S (sulfuro de hidrógeno), monóxido de carbono CO , gas de sílice, halocarbonos, gases fluorados (perfluorocarbono PFCs, hidrofluorocarbono HFCs, hexafluoruro de azufre SF_6), clorofluorocarburos HCFC, más removiendo el bióxido de carbono CO_2 que incluye 28% del biogás; para constituir un biogás o biometano limpio renovable denominado dulce con más del 95% de CH_4 y mejorar la eficiencia de combustión del generador eléctrico. Colocar una trampa con viruta fina de hierro para que las moléculas de H_2S reaccionen con el Fe, dejando pasar el resto del biogás. Un tamiz molecular de zeolita Silicoaluminioofosfato separa CO_2 del metano. Resultando un biogás de calidad y los fertilizantes sostenibles muy amigables con el ambiente. Por señalar un tipo de filtro, los gases ácido sulfhídrico H_2S y el metil siloxano $(CH_3OSi)_n$ para removerlos previamente del biogás hay que oxidarlos con la reducción de nitrato NO_3^- y nitrito NO_2^- . Con un filtro adicional el bióxido de azufre SO_2 , óxido nítrico NO_x (NO , NO_2 , NO_3^-). Hay otros gases contaminantes del aire que respiramos que son medibles; compuestos orgánicos totales COT, monóxido de carbono CO , partículas menores a 10 micras PM_{10} y menores $PM_{2.5\mu}$.

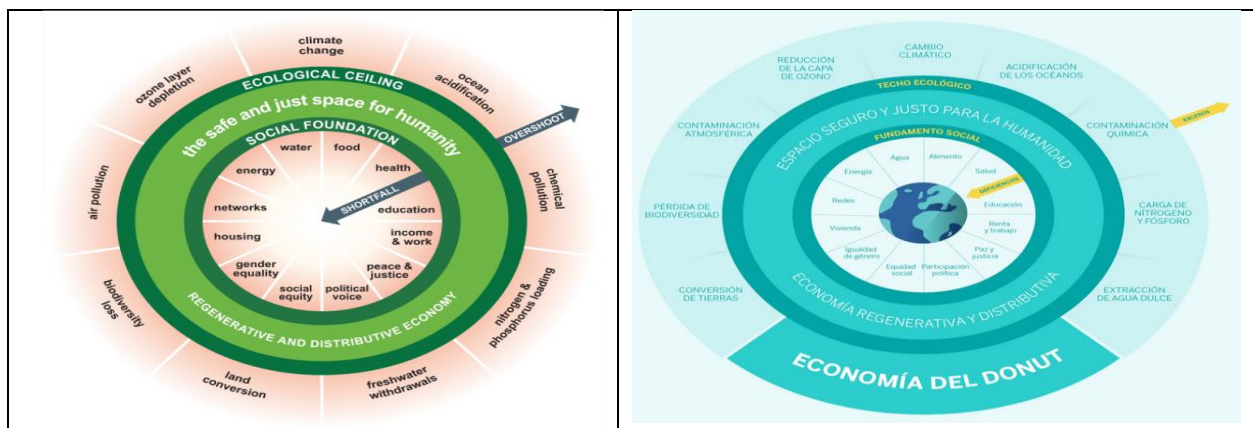
Otra manera es colocar una trampa de N amoníaco que mediante proceso biológico forme sulfato de amonio o N de nitrato el cual se puede comercializar como fertilizante y así se elimina N de los efluentes. Una realidad en Sioux Falls, Dakota del Sur. Ganar, ganar; filtrar y vender un fertilizante.

La producción de gas metano en granjas porcinas es favorecido por la inclusión mezclada de varios sustratos de productos en codigestión, principalmente si mejoran la estabilidad de la relación carbono:nitrógeno C:N de la que carecen las excretas porcinas. La relación óptima de la fermentación es de 15-40C:1N, pero las excretas de animales domésticos tienen rango de 2-10C:1N, por ello en la baja eficiencia de un sistema simple que requiere diseño del biorreactor eficiente. Por señalar un valor comparativo la paja de trigo es de 80C:1N. Weber 2012 indica que el crecimiento poblacional de la microflora va utilizando el carbono, disminuyendo paulatinamente la cantidad disponible de C y concentrando el N propio como abono agrícola. La relación carbono, fósforo y azufre C:P:S adecuada es 500-1000C: 5P: 3S. Al igual que los cultivos, para su multiplicación los microorganismos utilizan elementos esenciales nutritivos Fe, Co, Ni, Cu, Zn, Se, tungsteno W, Mo. Hay minerales inhibidores del crecimiento Cu, Ni, Zn, Cd, Cr, Pb. El níquel es un componente de la estructura celular, funciona en la coenzima de todas las bacterias metanógenas, interviene en la transferencia de electrones y actúa en varias enzimas.



Para balancear la relación carbono: nitrógeno se facilita agregando sobrantes agroindustriales de empaques de frutas, tubérculos y hortalizas; bagazo de cervecía, vid, agaves y jugos; desechos de rastros, lácteos, boñigas, junto a desechos o quimio del aparato digestivo de otras especies animales; salvados de harina, arroz y maíz; residuos del ingenio azucarera, aceite de palma; proceso de yuca Cassava; sustratos lignocelulósicos aserrín, cascarilla de arroz y pajas como sustratos absorbentes de cama profunda en la cría de animales; otros que aportan más carbono que nitrógeno al medio desbalanceado de cultivo, tomando en cuenta que la lignina y biopolímeros derivados de la hemicelulosa y celulosa son pobremente biodegradables; lodos municipales, etc. indicado que la diversidad del inóculo mejora el proceso fermentativo del biorreactor, pero también altera las poblaciones que producen CH_4 . Un estudio asume que la celulosa produce más metano que la hemicelulosa, sin embargo, la hemicelulosa es degradada rápidamente. Las moléculas de celulosa y hemicelulosa están rodeadas de lignina, lo cual no facilita la digestión bacteriana. Solo el 40% de estas moléculas se descompone en biogás.

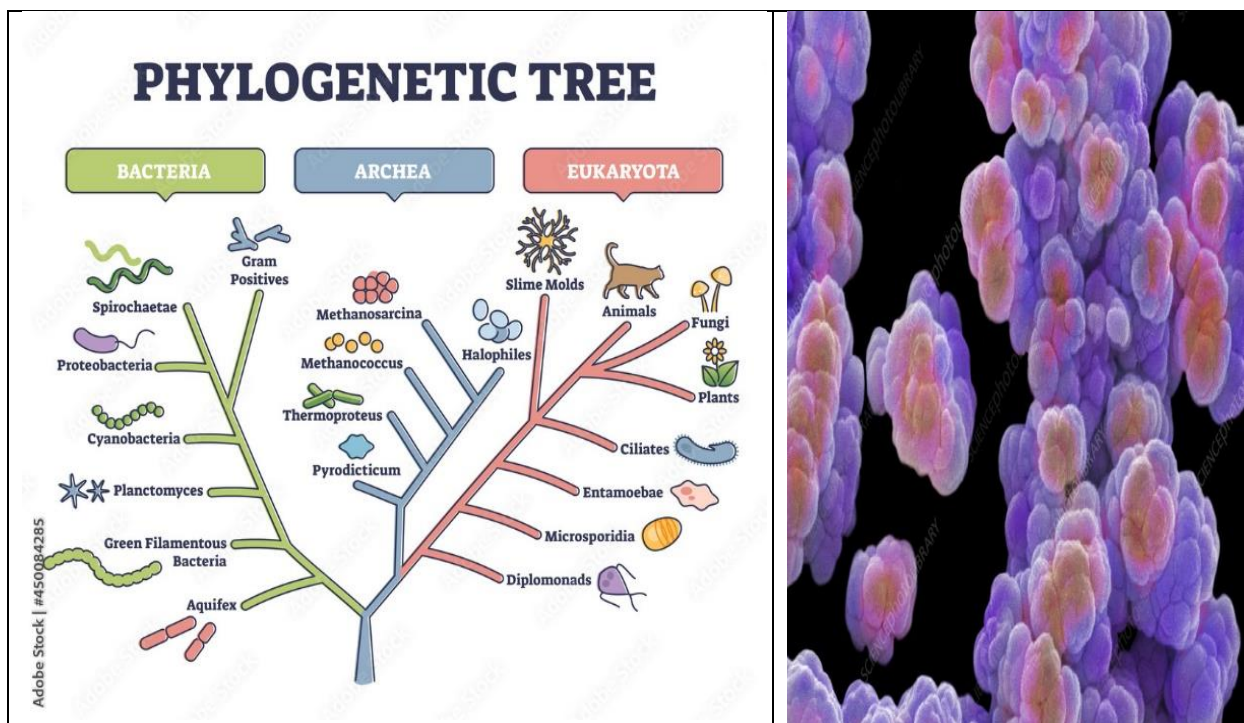
Todo es parte de un modelo regenerativo incluyente que mediante estrategias gerenciales distribuye los beneficios de las empresas para aumentar la productividad mediante la motivación del personal, en un todo de vinculación con cimentaciones sociales dentro y fuera de la unidad de producción con enfoque sostenible. Económicamente se explica con la figura de las donas.



MANEJO EFICIENTE DE LA MICROBIOTA DURANTE LA FERMENTACIÓN ANÓXICA

Para iniciar la actividad microbiana de un biorreactor anaeróbico se debe obtener como inóculo material maduro de otra planta de tratamiento que tenga años trabajando o de lo contrario incluir desechos del tratamiento del drenaje municipal. Se carga el recipiente con las excretas durante 6-8 semanas. Habrá producción de otros gases. El primer gas metano ocurre a las 4 semanas de iniciado el proceso.

Una buena cepa de microorganismos locales se forma después de 2 meses de fermentación del biodigestor con Cloasimonas acetógenas y 9 meses después se han formado colonias dominantes de Methanosaeta, Methanosarcina, especies microbianas más eficientes para la producción de gas metano. Otras poblaciones dominantes son Firmicutes, Bacteroidota, Proteobacteria, Spirobacterias. Lendomi 2022 indica que las poblaciones metanogénicas fluctúan durante el año por cambios de adaptación a la temperatura ambiental, se requiere más de 1-3 años para aclimatar microorganismos auto seleccionados para que produzcan gas metano por igual durante todo el año. Por ello durante la limpieza del biorreactor se debe dejar una parte como semilla del inóculo ya adaptado. Hay bacterias sulfato reductoras que bajan el contenido de H_2S del biogás. A mayor concentración de H_2S habrá menos bacterias que producen CH_4 . Por ello se requieren bacterias que metabolizan el ácido sulfhídrico.



Filogenia de bacterias, Archea y Eucariotes. Fotos de Archea.

La temperatura del rango de vida de las bacterias metanogénicas va de 4-100°C. Las bacterias psicofísicas 10-32°C se favorecen con 32°C, reducen su actividad entre 10-20°C y a menor temperatura de 10°C, viven, pero no producen CH₄. Las Mesofólicas se reproducen entre 32-43°C. Las bacterias Termofilicas se adaptan al calor 48-60°C. Un biorreactor añejo tendrá diferentes poblaciones vivas adaptadas; unas especies microbianas sobresalen sus poblaciones con temperaturas de 23°C en el agua del reactor, otras en ambientes de baja temperatura 10°C, en el rango de ambas temperaturas, habrá una especie de bacteria activa sin inhibiciones de crecimiento y habrá producción de metano. El rango mesofílico es considerado entre 20-45°C. La región psicofílico menor a 20°C todavía puede producir algo de CH₄. El rango termofílico va de 35-60°C.

Se abre un nuevo camino a la biotecnología todavía no disponible comercialmente con la metagenómica e ingeniería genética para inocular con poblaciones estables que produzcan altos rendimientos de biogás. Nuevos organismos con alta tolerancia de adaptación a diversos cambios ambientales dentro del biodigestor, capitalizando la degradación de la lignocelulosa. El uso de enzimas para catalizar fibras (celulosa, hemicelulosa) sigue limitado. Las endoglucanasas GH5-tCel5A1 y la GH5-p4818Cel5_2A son poderosas, pero se inactivan en ambientes no controlados. En el mercado hay xilanasas derivadas de *Thermotoga maritima* más termoestables que soportan el comprimido del alimento balanceado. La microflora de rumiantes, bacterias en el tracto digestivo de termitas Nasutitermes que tienen enzimas activas para degradar polisacáridos y lignocelulosa. Son materia de investigación básica.

Estrategias alimentarias para reducir el impacto ambiental del purín

1) Reducción del volumen y excreción de nutrientes

B) Aumento de la **digestibilidad** de los nutrientes:

- Formular con **materias primas** más digestibles
 - + Fibra + heces
 - Factores antinutricionales



Bagazo de cerveza



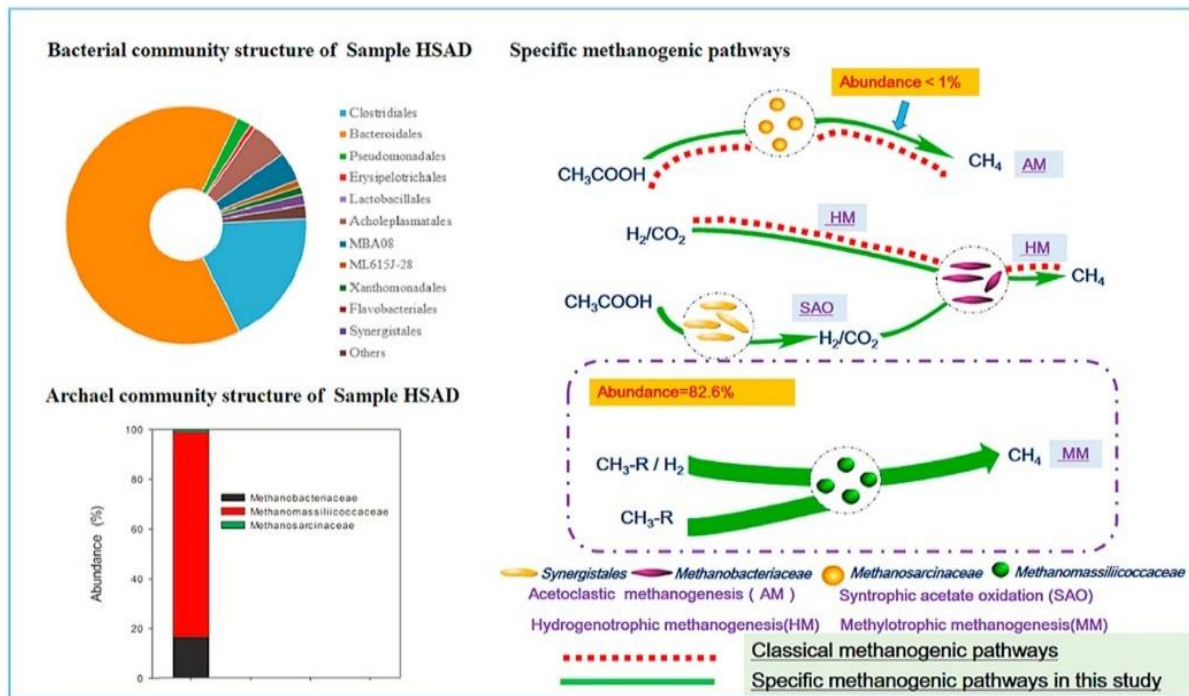
Pulpa de aceituna



Pulpa cítrica

Los inhibidores más comunes del crecimiento microbiano dentro del biodigestor son gases producidos por el propio sistema amonio, sulfitos, iones metálicos, metales pesados y sustancias orgánicas. Por supuesto entradas nuevas de oxígeno disuelto en el agua de limpieza. La mezcla favorece 3 unidades de H₂O por cada kilo de excretas. Se forma un equilibrio de poblaciones entre

bacterias que acidifican (ácidos orgánicos) el agua como medio de cultivo y las que metabolizan metano Chen 2008. Wang 2025 Si el medio de cultivo es favorecido con la presencia de Clostridiales, Coprothermobacter y Gelria pueden hidrolizar proteínas ácidas reacción que genera 11 compuestos fétidos de ácidos grasos volátiles, se reducen las emisiones de CO₂ buscando la neutralidad de las emisiones. A mayor población de Clostridio es un indicador de mayor producción de gas metano.



Los antibióticos aplicados al animal 90% quedan presentes en los efluentes como clorotetraciclinas, sulfametazol, oxitetraciclina, ciprofloxacina, enrofloxacin, azetromicina promueven poblaciones procariotas que generan etanol y otras bacterias Archaea metanogénicas los transforman en metano. No así las cefalinas, cetalina tienen efecto negativo en otras poblaciones que producen CH₄. Aplicar la mezcla de clorotetraciclina y oxitetraciclina afecta las etapas de acidificación, lo que trae consecuencias para las especies Archae provocando una baja eficiencia de aprovechamiento energético. Sulfonamidas con sulfatiazina se optimiza el proceso de acidificación, favoreciendo a la Clostridia y Bacteriodes que producen ácidos grasos volátiles e hidrógeno, sustratos básicos para la metanogénesis, pero con menor eficiencia metabólica.

Son miles de especies de Archaeas las que intervienen en la fermentación de sustratos para generar biogás, unas presentes en el aparato digestivo de los animales y otras existen en el suelo y pantanos. Se enlistan solo para resaltar que la producción de gas metano no es una reacción simple de un solo microorganismo: *Methanobacteria thermoclorotrophicum*, *Methanococcoides methylutens*, *Methanococcus capsulatus*, *M. trichospora*, *M. vanielli*, *Methanococcus voltae*, *Methanocorpusculum parvicum*, *Methanosarcina barkeri*, *Methanospirillum hungatii*, *Methylovulvum micocosa* *alcaliphilium*, *Methylovulvum micocosa* *buryatensis*. El *Methanococcus*

maripaludis convierte $\text{Formato} + \text{CO}_2 \rightarrow \text{CH}_4$. Pero en realidad la reacción compleja $\text{Formato} + \text{CO}_2 + \text{Alcholes simples} + \text{metilos } \text{CH}_3 + \text{H}_2 + \text{Acetato} + \text{Enzimas y Coenzimas}$; sin la presencia de oxígeno O_2 , NO_3^- , SO_4^{2-} , Fe^{+3} , que son receptores de electrodos participan bacterias con reacciones metanogénicas, hidrogenotróficas H_2 - (humanos y granjas) con la intervención de bacteria Aceticlasticas Ac (cultivo de arroz) y Methylotróficas Me (en los océanos). Su estudio biotecnológico resalta 35 géneros con potencial industrial. Las células tienen grandes cantidades de Fe intracelular, con genes 4Fe-3S . Serían fábricas potenciales para producir proteína, biocatálisis y bioquímicos. Los estudios siguen en proceso para aplicación real.

ESTRATEGIAS DE MANEJO EFICIENTE DEL BIORREACTOR

Agregar bicarbonato de sodio (Na_2CO_3) compuestos químicos como agentes alcalinizantes con propiedades bufferizantes mejoran el medio de cultivo para la producción de gas metano Kuhn 2023. Agregando óxido de magnesio en proporción de 30 Kg por metro cúbico m^3 de laguna mejora 40% la producción de gas metano. Aplicar silicato de aluminio (zeolita) absorben NH_3 que se incorpora al abono y no a la atmósfera. Otras múltiples arcillas como silicato de magnesio $\text{MgSi}_6\text{O}_{15}(\text{OH})_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ son absorbentes de NH_4^+ inhibiendo la nitrificación y regulando poblaciones de bacterias.

Estrategias alimentarias para reducir el impacto ambiental del purín

• **Pretratamientos** de las materias primas y uso de **enzimas/aditivos**

Tecnologías de secado: baja temperatura / poco tiempo / presión



Fermentación sólida: aumento disponibilidad de la PB y grasa; Mejora digestibilidad coproductos fibrosos (Shi et al., 2017)



Enzimas y otros aditivos:

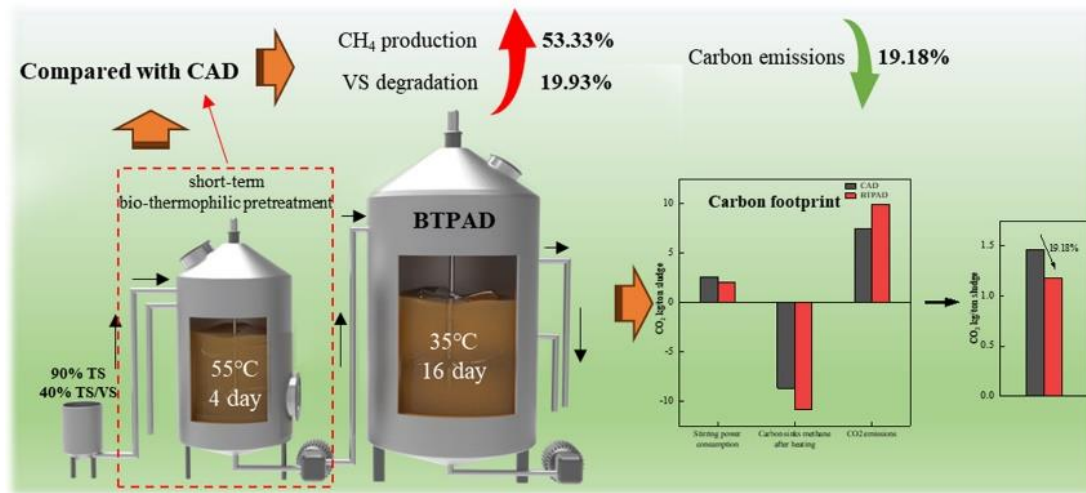
- **Fitasas:** P fítico cereales (**MTD**)
- **Carbohidrasas:** fibra (amilasas, B-glucanasas, xilanasas, pectinasas, mananasas, galactosidasas)
- **Proteasas:** proteína



- Mejoran digestibilidad nutrientes
- Mejoran palatabilidad de los piensos
- Reducen viscosidad intestinal
- Modifican lugar de digestión de nutrientes
- Modulan poblaciones microbianas

(Rojas y Stein, 2017; Cowieson y Roos, 2016; Raza et al., 2019; Chassé et al., 2021)

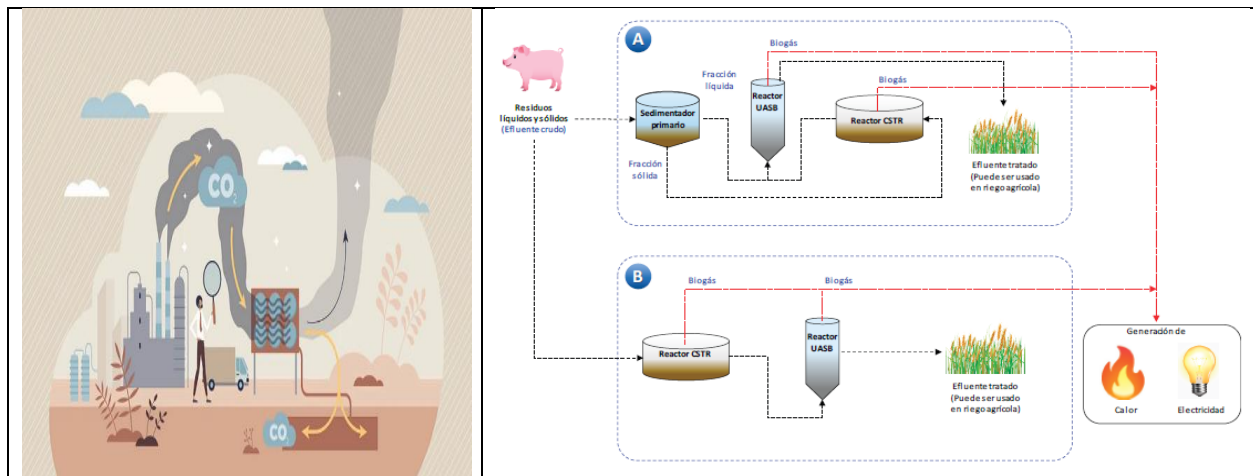
La aspersión de ácido sulfúrico H_2SO_4 inhibe la metanogénesis en 92% CH_4 , 99% CO_2 , 99% NH_3 . Baja la producción de GEI al inhibir a los ácidos grasos volátiles. Controlando bacterias *Rhodospseudomonas palustris*, *Bacillus subtilis*, *Bacillus amyloliquefaciens*, *Bacillus licheniformis*, *Nitrosoma europaea*, *Nitrobacter winogradskyi* y se incrementa la phylia de firmicetes, *Coprothermobacter*. Un exceso de ácidos grasos libres inhibe la actividad microbiana. Un pH 5 con ácido láctico reduce 90%, con H_2SO_4 85%, HCl 60%, ácido cítrico entre 17-75%. Agregar $FeCl_2$ inhibe la formación de H_2S , pero agregar Ni, Co, Mo, Se, junto a Fe, Zn, Cu producen más CH_4 . Se mejora con Fe-5Ni en 0.1 micro moles. Mezclas de 250Ca-500Mg hay incremento de biogás, Mn 2.5, Co10, Zn5 también. Hierro con Valente cero, productos alopáticos clorinados, nitrobenzenos, blanqueador orgánico, no se conoce la combinación perfecta de compuestos.



Debajo de pH 5.5 y por arriba de pH 8 se reduce la actividad metabólica de la mayoría de las enzimas metanogénicas. Acetatoquinasa, formilmetanofuran dehidrogenasa, tetrahidrometanopetrin S-metil transferasa. Con pH menor de 7.0 más nitrógeno NH_4^+ estará en los sólidos de las excretas. Para la obtención de gas metano se favorece con alrededor cercano al pH de 7.0.

Los estanques o pilas de almacenamiento de excretas deberán ser manejadas adecuadamente al pasar de los galpones hasta la laguna de decantación exterior. Al interior de las maternidades se colocan sistemas ionizadores de alto voltaje para liberar cargas eléctricas a las moléculas del aire causando un efecto bactericida en las superficies de las parideras. Controla poblaciones de *Bacillus subtilis*, *Escherichia coli*, *Listeria monocitogénica*; las partículas menores a 2.5 micras se precipitan, lo mismo la PM 10, el NH_3 se reduce a 3ppm, ya que niveles de 10 ppm bajan la salud animal, con menor efecto para gases como H_2S y CO Baggio 2022. Pueden ser micro aspersores de ozono líquido para obtener resultados similares. Hay productos químicos de lenta liberación que, aplicados en forma preventiva, regulan el pH para que la materia orgánica no se descomponga por los microorganismos en gases amoníaco (NH_3) que causa lluvia ácida, nitrato (NO_3^-) y nitrito NO_2 es un gas con efecto de invernadero (GEI) y así los sólidos no formen costra o espuma para que las heces acumuladas por 6 meses mantengan sus valores nutritivos para ser aplicado como

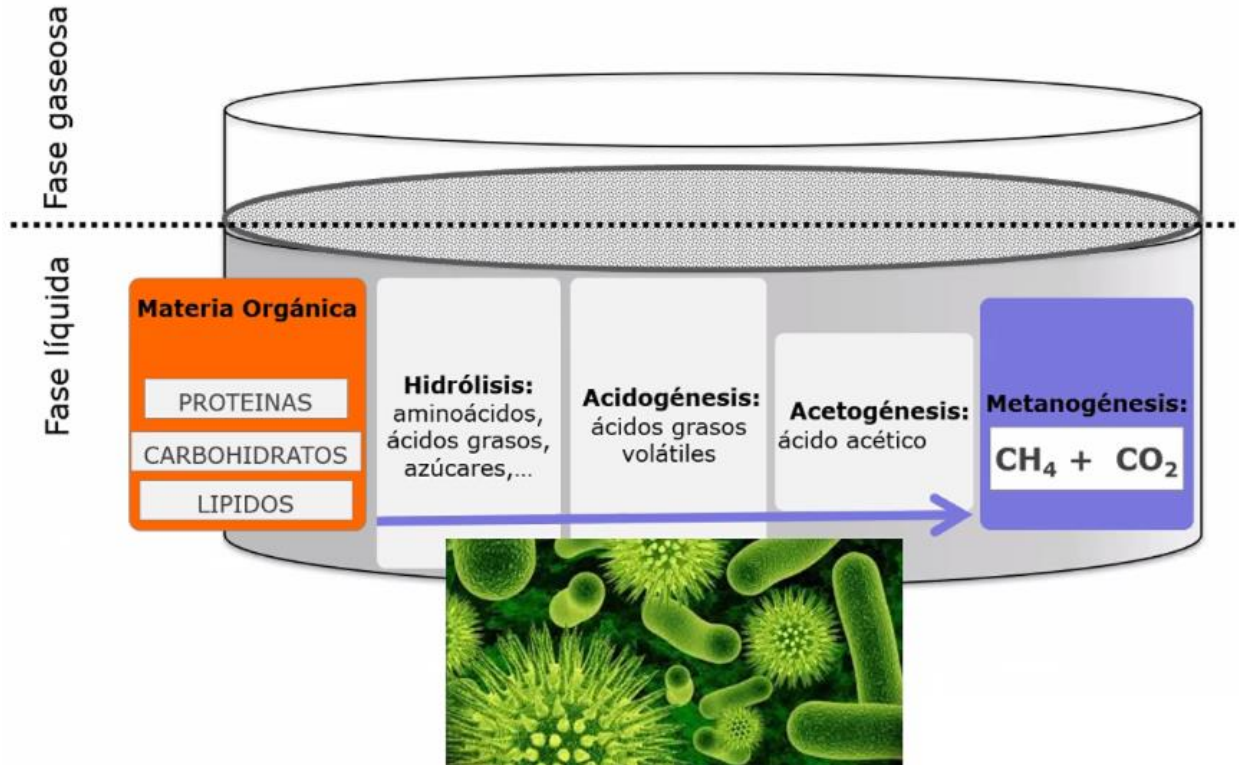
fertilizante. Ma 2022 la aplicación uniforme de 3 Kg de H_2S por mes, por cada metro cúbico m^3 de estanque abierto de retención de excretas, buscando tener en la laguna un pH 6.0 con la presencia de ácidos grasos volátiles disociados, se reduce las emisiones de CH_4 , NH_3 en más de 50%, minimiza olores 4-metilfenol, los gases H_2S en el aire bajan mucho. Un fotoreactor catalizador con moléculas de cloro gasificado y luz solar hace que el gas metano haga reacción rápida $\text{CH}_4 + \text{Cl} \rightarrow \text{CH}_3 + \text{HCl}$ eliminando el metano del aire que respiramos Krogsboll 2023. Esta es una reacción fisicoquímica simple, no así el proceso biológico que implica 20 reacciones metabólicas e implica la intervención de muchas especies microbiológicas. Listo para salir al mercado una máquina lanzadora de un rayo artificial o soplete de plasma que cruce de lado a lado la pila de excrementos para encapsular el metano de la laguna de digestión y encierra la liberación de amoníaco, enriqueciendo las excretas como abono. Un reactor magnético incrementa el metano.



Otra acción efectiva para reducir emisiones de metano es haciendo diariamente separación de excretas sólidas de los líquidos disueltos y en suspensión y posteriormente controlando las cantidades e inóculos proceder al tratamiento de digestión anaerobia, con la generación de biogás Valdez 2022. En Vietnam separan desde el momento de la defecación, con diseño de pisos y rendijas (slats) físicamente los orines de las heces para minimizar los malos olores.

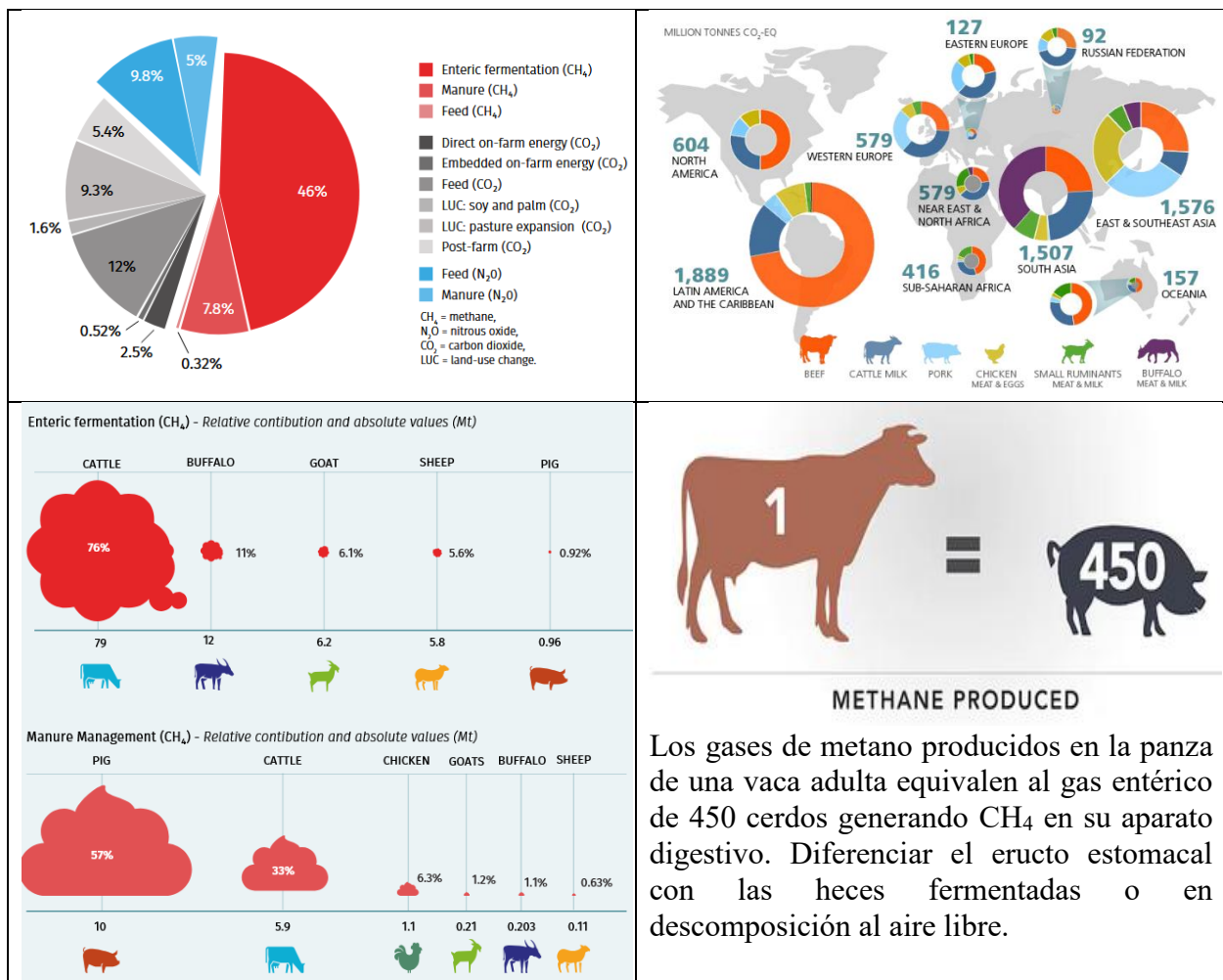
Estrategias alimentarias para reducir el impacto ambiental del purín

Gases más importantes: metano (**CH₄**)



Los polvos ricos en hierro Fe de África del Norte que llegan al Atlántico catalizan reacciones en el aire generando cloro Cl, con el radical hidroxílico OH, un químico que precipita el metano. $\text{Cl} + \text{CH}_4 \cdot \text{O}_2 \rightarrow \text{CH}_3\text{O}_2 + \text{HCl}$ y el ozono es controlado con la siguiente $\text{Cl} + \text{O}_3 \rightarrow \text{ClO} + \text{O}_2$. Procesos que ayudan, pero no son la solución completa al calentamiento global, no es fácil asperjar al aire atmosférico átomos de Fe en volúmenes tan grandes como un país.

Pero si es factible utilizar la propiedad magnética intrínsecas del $\text{Fe}_3\text{O}_4\text{NP}$ que remueve metales pesados, asperjándolo en una laguna de retención con excretas porcinas y además actúa en la membrana celular de bacterias magneto tácticas, reduciendo su actividad fermentativa. Aplicar magnetita a la laguna incrementa la producción de CH_4 .



Las grandes emisiones de CH₄ para un rumiante (bovino, búfalo de agua, caprino, ovino) se producen en la panza, poco en las cuachas y menos en el alimento. Ello impacta a nivel mundial por el número de cabezas en cada región. En cambio, aves y cerdos no generan grandes cantidades de gases intestinales. La gráfica nos indica que las heces del cerdo realmente contribuyen a la producción de metano.

Excrementos por animal y estimación de energía

Actividad	Toneladas frescas por animal por año	Sólidos totales ST y sólidos volátiles SV (%)	Biogás metros cúbicos m ³ / TVS m ³ /animal/año	Número de animales necesarios 100 kWh. Solo excretas
LECHE	19	10 (75)	380 (527)	800
CERDO ENGORDA	1.6	7.5 (70)	420 (35)	11,000
HUEVO POSTURA	0.02	50 (70)	500 (35)	120,000

Los metros cúbicos de metano por kilo de VS en cerdo 0.45 m³CH₄/kgVS, leche 0.24, ganado 0.18, postura 0.39, pollo 0.36 m³ CH₄. Cuantificar bien los valores generados permite conocer si realmente hay reducciones de control y acción.

El campo de la formulación, alimentación y nutrición animal con precisión será de vital enfoque para reducir emisiones entéricas de gases y menor cantidad de heces contaminantes, aplicando soluciones naturales, incluyendo fermentos sin llegar a putrefacción de grano de soya o pescado con proteínas más digestibles en la dieta por el proceso que destruye los factores antinutricionales (tripsina), oligosacáridos (lectina), sabores amargos; usar extractos de proteína hidrolizada, alteración física del alimento (tamaño de partícula) aunado al diseño de comederos grupales e individuales, técnicas de producción, desarrollo tecnológico del alojamiento, junto a prácticas de manejo para mejorar la eficiencia alimenticia. Un cerdo en engorda respira 1.70 Kg de CO₂ por día, con calor y humedad relativa se incrementa el ritmo. Se ejecuta un análisis sistemático de impacto ambiental a través del ciclo de vida del cerdo (reproductor, reemplazo, engorda) bajo un modelo sostenible para reducir emisiones. Ya hay software para el balanceo de raciones a mínimo costo que incluyen reducción en la huella de carbono. Resulta ambientalmente más eficiente una dieta con 16% de proteína cruda y aminoácidos sintéticos que una con 18% de P.C., si bien hay cambios en la calidad de la canal, se puede limitar la proteína de la pasta de soya y almidón (trigo) proveniente del desmonte de bosques o de la sabana tropical. Formular por lisina, metionina, treonina, triptófano, valina y arginina para mejorar la digestión, salud intestinal, sin gases entéricos y bajar la dieta de 20% de proteína cruda hasta 13% de P.C.

Evitar lactaciones cortas menores a los 21 días.

Días en lactación materna	Peso Kg al destete	Peso Kg a los 165 días de edad
16-18	4.7	92
19-20	5.3	96
21-22	5.6	98
23-24	6.0	103
25	7.2	102

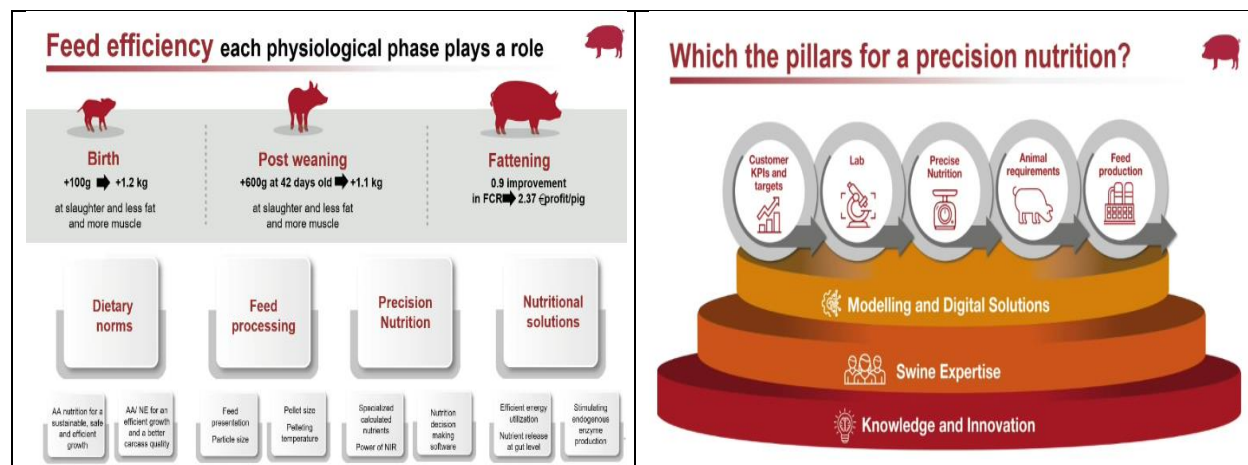
Ofrecer a los lechones lactantes y destetados suplementos creep feed con calostro seco, inmunoglobulinas, sangre y huevo secos por microaspersión, minerales traza, ácidos grasos omega 3, enzimas, ácidos orgánicos, fibra funcional, agentes antimicrobianos con aceites esenciales, extracto de plantas, ácidos orgánicos, soya fermentada, pescado ensilado, proteína unicelular, harina de insectos con 80% de proteína cruda, proteína sintética químicamente, antioxidantes, electrolitos. Los pequeños avances a edad temprana se reflejan en grandes mejoras al finalizado.

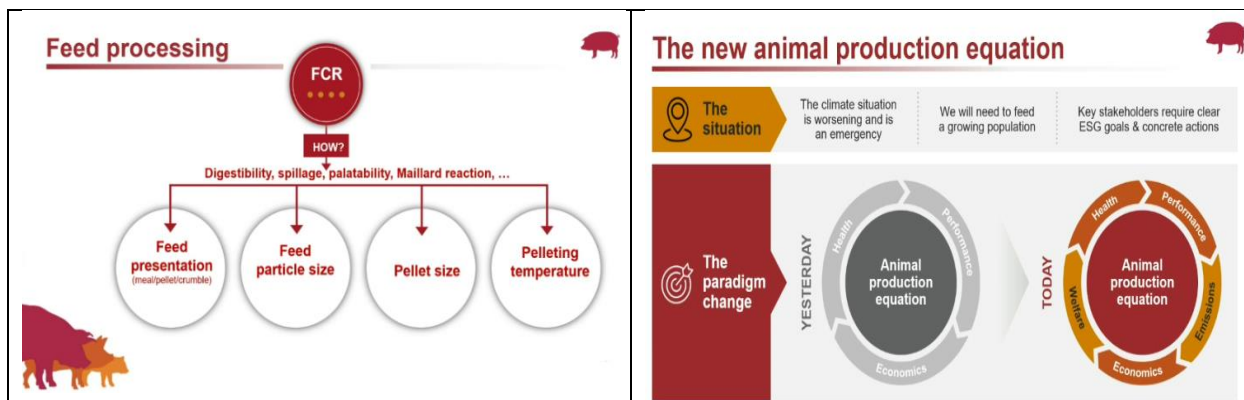
Incluir ácidos grasos de cadena corta (SCFA) beneficia la digestión. Los ácidos grasos de cadena ramificada (BCFA) perjudican la salud intestinal. Si falta fibra dietética, el microbiota fermentará la proteína que se encuentra en el intestino grueso y formará BCFA, NH₃ con deyecciones de urea y fenoles. Usar pastas tratadas de leguminosas y oleaginosas que bajo control han destruido los

factores antinutricionales. Incluir carbohidratos fermentables como fructooligosacáridos, lactitol o almidón resistente. Aportar fibras solubles e insolubles como pulpa de remolacha, salvado de trigo.

Las naves de engorda contienen deyecciones con mayor contenido de nutrientes que una granja de maternidades. Aplicar emulsificadores a las grasas de la dieta para mejorar la digestión. Regular la dieta para minimizar la producción de gases en el intestino largo. Controlar el tamaño de partícula o comprimidos del alimento balanceado. Limitar el consumo de carbohidratos fermentables, agregar fibra soluble, ácidos grasos, monoglicéridos. Al incrementar el consumo de fibra no digerible o insoluble se baja el metano entérico del animal, pero se incrementa en la fosa de retención de excrementos. Las grasas no digeribles también alteran. Usar aditivos: probióticos, prebióticos, enzimas en la dieta, hiervas medicinales. Por supuesto que todo involucra la salud de los animales e inmunidad de la pira.

Hay ventajas de conversión con el uso de comederos húmedo/seco. Asperjar el alimento con aceites y debajo de la rendija de los pisos reduce las emisiones. Para ello el Consejo Nacional de Investigación (National Research Council NRC 2012) que publicó las tablas de los requerimientos nutricionales del cerdo ahora National Academies Press Council (NAP) se adecua al avance genético alcanzado por las empresas porcícolas y lanzará la nueva tabla actualizada de los requerimientos nutricionales porcícolas en el 2026. Adicionalmente hay tablas brasileñas, argentinas, francesas, inglesas, norteamericanas, del sector privado, como las FEDNA 2019 españolas, etc. publicando los valores y contenido de nutrientes de los insumos utilizados en la formulación de dietas animales, que mediante cálculos computacionales se introducen en la alimentación como las mejores opciones económicamente viables y digestivas para la mejor eficiencia rentable de producción, incluyendo el manejo de los alimentos con menor aporte contaminante. No se argumentan ampliamente en este artículo por tener alcance para otras especialidades. Pero es bueno saber que estas herramientas están disponibles y a la mano.





La incorporación de granos de destilería de trigo o maíz a la dieta balanceada de cerdos en cualquier etapa fisiológica incrementa el volumen de las heces y a la larga resulta en una mayor producción de gas metano por cerdo producido. Incluir grano de cebada para bajar el % de proteína bruta de la ración de cerdos en finalizado reduce el impacto ambiental. Incluir salvado o derivados de trigo mejoran la digestión y baja la producción de metano en la laguna aeróbica.

Modificar los niveles de micro minerales en dietas. El Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación nacional y la ANAPORC española han publicado todo un tratado de 200 páginas, con las bases zootécnicas para el cálculo del balance alimentario del nitrógeno y fósforo para las especies domésticas en granja MAPA 2024. Utilizar aditivos varios, enzimas, extractos fitoquímicos de plantas medicinales. En Colombia usan zeolita en la comida, limpieza, higiene, sanidad, control ambiental, ventilación, bienestar zootécnico y otras prácticas de manejo de los alimentos han permitido 35% de reducción en las emisiones GEI por kilo de cerdo producido. Pero hay mucho más que hacer en la nutrición y alimentación porcícola.

Así que es tiempo actual de echar a andar conocimientos y experiencias con enfoque de conservación verde y azul que impulsen estas prácticas que contribuyan al cuidado del medio ambiente y no solo deshacernos de la materia orgánica sobrante echándola al suelo agrícola o enterrándola en depósitos de tierra, tampoco solo quemar el gas metano al aire cuando se pueden producir polihidroxibutirato y de las boñigas transformarlas en polihidroxialcanoatos con cultivos de *Metillocystis hirsuta*. Remover el metil siloxano volátil del biogás colectado ya que al ser quemados liberan bióxido de silicio SiO_2 o sílice (arena), un gran aportador del calentamiento global, un gas incoloro con propiedades venenosas. El metano es un alcano incoloro e inodoro. El H_2S es un gas más pesado que el aire, inflamable, incoloro, pero si es odorífero. Esa era de la basura ya pasó es cosa del pasado. Si no te actualizas con biotecnología hay multas y restricciones de mercado de los alimentos.

Hay diversas tecnologías que se diferencian en sus procesos y materia de transformación, desde medicamentos, cosméticos, plásticos, abonos hasta reactivos químicos, azúcares, energía calórica, energía eléctrica y otras alternativas que transformen los problemas de contaminación y olores en oportunidades de mejora ambiental con cotizaciones de bonos de carbono internacionales y

alternativas diversificadas para generar ingresos. En México el Fideicomiso Instituido en Relación con la Agricultura (FIRA) ha participado 2018-2020 emitiendo bonos verdes ambientales hasta por \$7,000 millones de pesos en 900 proyectos. Hay organismos internacionales participando en México con el sistema de comercio de emisiones y bonos de carbono. También la agencia de cooperación alemana valorando créditos de compensación. Otros más participan.

<https://www.youtube.com/watch?v=HRDBsYCaEDw>

<https://www.facebook.com/SistemaBiobolsa/videos/webinar-beneficios-del-biodigestor-en-granjas-porcinas/524477896809990/>

Las plantas generadoras producen calor que debe ser aprovechado en el secado de compostas, reciclar el calor hacia el propio sistema del biorreactor como pretratamiento térmico y con ello minimizar 20 veces el tamaño inicial del volumen del bioreactor, recobrar el calor del escape desperdicio y convertirlo en aire frío con un enfriador de absorción, comprimir el gas para el tanque de combustible de los vehículos de la granja. Biorrefinería, fermentación, hidrólisis enzimática, biochar (carbonización de residuos orgánicos, no de madera o carbón vegetal) desarrollo de bioprocesos unicelulares, por mencionar algunos y el que más nos ocupa en este artículo la Digestión Anaeróbica.

Si nos apegamos a la tradición, del cerdo nada se desperdicia, hasta las pezuñas se usan como tébaris para la danza del venado, todo es útil, hasta los gases.

ESTADO DEL ARTE

El foro global de metano 2024 en Suiza sería imposible resumirlo, todo un esfuerzo para controlar las emisiones de los yacimientos petrolíferos, pero ello no debe escatimar la aplicación de modelos con tecnologías modernas de biorremediación en el sector agropecuario, que todavía no ha sido implementada, solo la liderean Noruega, Bélgica, Italia y Reino Unido. Se señala para su acceso. <https://globalmethane.org/2024forum/speakers.html>. Resaltar medidas para mitigar las emisiones https://nap.nationalacademies.org/resource/27732/2024_NASEM_Public_Briefing_Slides.pdf. El IV foro 2024 realizado en México por el Consejo Nacional de Biogás <https://www.cnbiogas.mx/iv-foro-biog%C3%A1s-m%C3%A9xico-2024>, https://www.youtube.com/watch?v=JhTeO6Yu_Do.

Las medidas de mitigación sobre el metano en México en el marco del compromiso global con el acuerdo de París, para definir la hoja de ruta e implementación del Global Methane Pledge coordinado por Secretaría Medioambiente Recursos Naturales (SEMARNAT), Secretaría de Energía (SENER), Agencia de Seguridad Energía y Ambiente (ASEA) con las mejores prácticas internacionales. <https://www.facebook.com/PoleaAC/videos/-sigue-la-transmisi%C3%B3n-en-vivo-del-foro-compromisoglobalmetano-elementos-claves-p/3156994267957411/>. Incluye una gestión integral del estiércol del ganado bovino y porcino estableciendo biodigestores para generar biogás. La advertencia límite de reducción para México de 1.5°C al mínimo impacto 2030 de las emisiones de metano necesitan bajar 60% en el sector de las energías fósiles, para basura urbana

35% ya hay 30 biodigestores grandes en el País y en la agricultura 25% menos contaminantes con agricultura de precisión y mínima labranza.

El programa mexicano del carbono PMC 2008 presentó la agenda azul y verde resaltando que la atmósfera del planeta alcanzó en abril 2024 las 426 ppm de CO₂, valores que no se habían presentado hace 2 millones de años, si no hay acciones inmediatas de cambio con emisiones CO₂, CH₄, N₂O el incremento de la temperatura de 1.1°C llegará a 4°C al final del siglo XXI. <https://pmcarbono.org/pmc/publicaciones/eccm.php>

Para una granja porcina mexicana de 1,000 vientres se excavó un biodigestor con capacidad de 2,700 m³, lagunas de sedimentación 1,500 m³, Laguna de oxidación 650 m³, tinas de oxigenación 600 m³, motor generado de 60 KW.





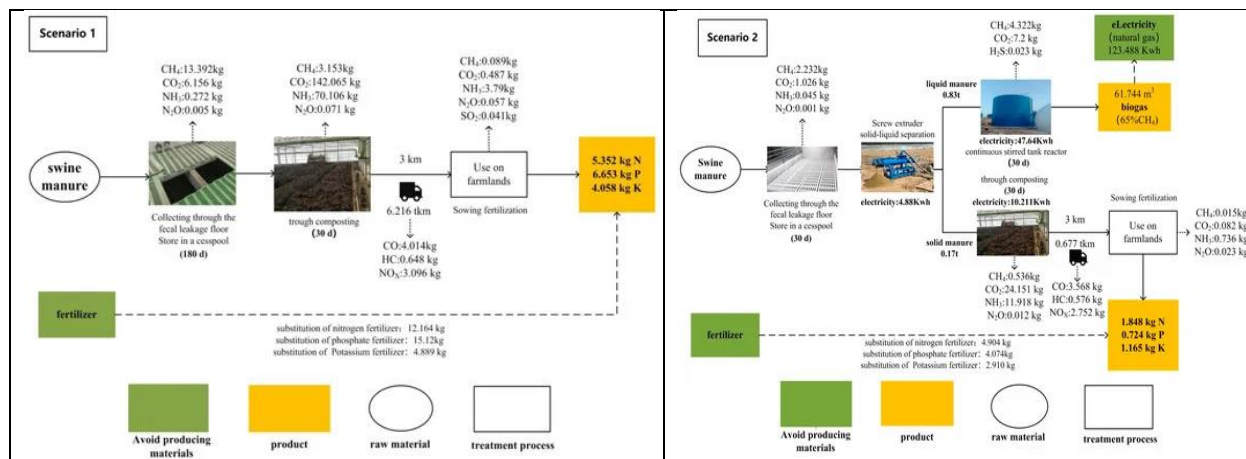
Para una granja porcina: Preparación del terreno, adecuar el talud para evitar derrumbes, proteger con hule plástico en la base y paredes de tierra del talud, colocar la geomembrana, instalar el sistema de agitación hidráulico (no aeróbico), poner el sistema de captación de biogás, colocar la cobertura flotante, probar biodigestor. Se producen 25,000 kWh mensuales y se colectan 40 toneladas de composta mensual, representando ahorros e ingresos.

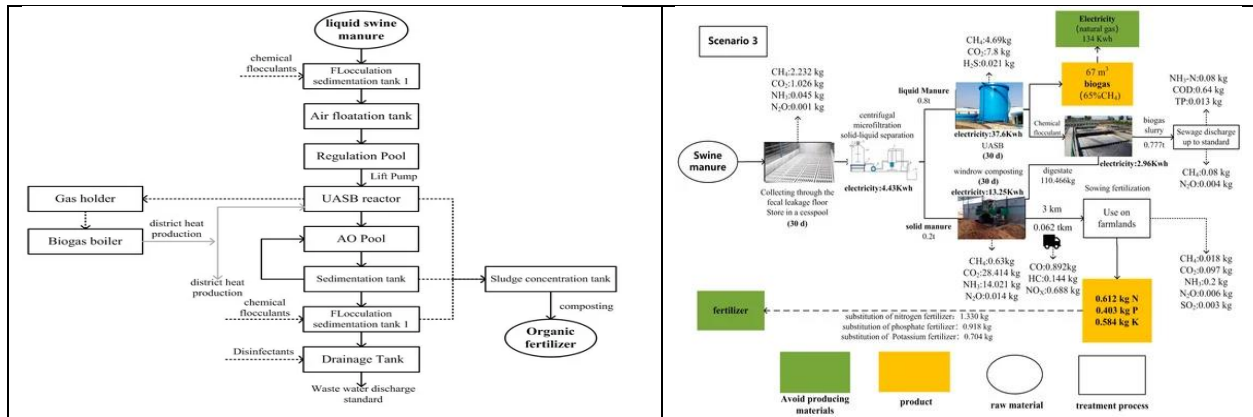
Se puede estimar una producción de gas metano de 238 mililitros de gas metano por cada gramo de sólidos volátiles de las excretas agregadas ($\text{mlCH}_4 \cdot \text{gVS}^{-1}$). Si se reciclan los efluentes líquidos se incrementa la eficiencia a $278 \text{ mlCH}_4 \cdot \text{gVS}^{-1}$ e incluyendo un agregado de alimento fermentado líquido en codigestión se incrementa a $327 \text{ ml CH}_4 \cdot \text{gVS}^{-1}$ por el aumento de materia a fermentarse. Hay que mantener el pH constante, es un biorreactor vivo que puede ser alterada la composición de su microbiota, muestrear periódicamente la laguna para evitar la formación de ácidos grasos volátiles y buscar inhibir la formación de amonía en la superficie flotante y en la cámara de biogás.

Cabezas CERDOS	PRODUCCIÓN ANUAL m^3	kWh al año
8900	1000	315,360
7900	900	275,000
8640	1400	483990
4400	300	66430

Varía la eficiencia según el diseño del equipo biorreactor y su localización geográfica.

Con la instalación de un biorreactor anaeróbico de 3 etapas secuenciales conectadas en serie de tandas continuas para la producción de gas metano, operado a 37°C con un reciclado ajustado de pasar los efluentes de la salida en la etapa 3 regresarla a la entrada del biorreactor uno, controlando con NaOH el pH de 5.5 del primer reactor, dejando libres la acidez de las otras etapas. La entrada de $18 \text{ kg/m}^3 \text{ día COD}$. El rango volumétrico del biorreactor 5:5:20. El funcionamiento del sistema es más eficiente para producir gas metano e hidrógeno, hay altas concentraciones microbianas en las tres etapas, se mantienen valores altos de alcalinidad, pH y los micronutrientes disponibles para la digestión anaeróbica.





CONCLUSIÓN

Un proceso para enmendar las tierras agrícolas es aplicando abonos orgánicos para mejorar la estructura del suelo aportando fibras de celulosa que permitan retener la humedad relativa del suelo, incrementar el aporte de carbono como nutriente de la microbiota mediante carbohidratos no digeridos y que no fueron fermentados durante el proceso de biodigestión durante el acopio de efluentes en granjas porcinas con lagunas de sedimentación, previos a la aplicación del terreno para siembra. El producto como fertilizante alcanza valores diferentes desde la formulación balanceada de la dieta para cada fase de desarrollo fisiológico de los animales en producción, como del diseño en las instalaciones, equipo de ventilación y comederos, manejo zootécnico de los animales, sanidad e higiene, tiempo de retención de las excretas, estación del año y método de extracción y aplicación de los sólidos a incorporarse al suelo.

Al introducir una variable tecnológica de biorreactores anaeróbicos para la producción de biogás metano, también altera la composición química final de los efluentes finales tanto sólidos como líquidos, ya que la intervención fermentativa de microorganismos metaboliza las heces en gases y los remanentes contienen menor cantidad de carbohidratos, concentrando aún más los minerales en la parte sólida del digestato final, con una reducción de compuestos celulósicos. La parte líquida contiene menos solutos y partículas en suspensión que puede ser reciclada para limpieza o aplicada al sistema de riego agrícola al carecer de coliformes que contaminen los cultivos.

De esta manera debe quedar claro que cada lote para cada sitio de producción y estación del año, la composición química y propiedades físicas del producto final es variable y se altera de acuerdo a la eficiencia del sistema de biodigestor instalado para la producción de biogás.

Con fines de fertilización de precisión y conociendo las deficiencias minerales de cada suelo agrícola se recomienda realizar un análisis bromatológico de los efluentes sólidos para no contaminar la tierra arable con un exceso de minerales, que no necesita el cultivo a sembrar.

Tomar en cuenta que el año 2023 ha registrado mundialmente las temperaturas más altas del siglo XXI, con grandes impactos en los sistemas naturales. El año 2024 fue atípico con records de 50°C.

REVISIÓN DE LAS REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS O LITERATURA CITADA

Achinas Spyridon 2020. Rambling facets of manure-based biogas production in Europe: A briefing

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032119307749>

Baggio Anna 2022. Effect of negative air ionization technology on microbial reduction of food related microorganisms.

Chen Ye 2008. Inhibition of anaerobic digestion process: A review

<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0960852407001563>

Feuchter A. Fernando R. 2024. Producción de gas metano en una granja porcina.

<https://axoncomunicacion.net/produccion-de-gas-metano-en-una-granja-porcina/>

<https://axoncomunicacion.net/wp-content/uploads/2024/07/FRFA-ARTICULO-GAS-METANO-JULIO-2024.pdf>

https://www.engormix.com/porcicultura/manejo-efluentes-residuos-porcinos/produccion-gas-metano-granja_a54289/?utm_source=notification&utm_medium=email&utm_campaign=1-1-0&smId=5e23338a1a8e836683d2a03c4f45407f&src_ga=1

https://www.engormix.com/porcicultura/manejo-efluentes-residuos-porcinos/produccion-gas-metano-granja_a54289/

<https://www.mexicoganadero.com/blog/biocombustiblegranjaporcina.php>

<https://www.portalveterinaria.com/porcino/articulos/44461/produccion-de-gas-metano-en-una-granja-porcina.html>

<https://www.portalveterinaria.com/upload/20240828094734Producciondegasmetanoenunagranjaporcina.pdf>

<https://www.vetcomunicaciones.com.ar/page/articulos/id/769/title/Producci%C3%B3n-de-gas-metano-en-una-granja-porcina>

<https://www.visionporcina.com/post/articulo-producci%C3%B3n-de-gas-metano-en-una-granja-porcina>

Feuchter A. Fernando R. 2024. Principios de la producción de gas metano porcino en lagunas anaeróbicas.

<https://axoncomunicacion.net/principios-de-la-produccion-de-gas-metano-porcino-en-lagunas-anaerobicas/>

Feuchter A. Fernando R. 2024. Una revisión sobre la producción de gas metano porcino en lagunas anaeróbicas. Abanico veterinario.

<https://abanicoacademico.com/abanicoboletintecnico/article/view/159>

<https://abanicoacademico.com/abanicoboletintecnico/article/view/159/127>

<https://www.google.com/url?sa=i&url=https%3A%2F%2Fabanicoacademico.com%2Fabanicoboletintecnico%2Farticle%2Fdownload%2F159%2F127%2F209&psig=AOvVaw1BhqvwglvKbyBz3h4e2IgT&ust=1725558440089000&source=images&cd=vfe&opi=89978449&ved=0CAQQn5wMahcKEwiA-fSg7KmIAxUAAAAAHQAAAAAQBA>

Feuchter A. Fernando R. 2024. Producción de gas metano con enfoque de bioeconomía en una granja porcina para reducir su impacto ambiental y amortizar la inversión del biodigestor.

Porciculturas.com

Feuchter A. Fernando R. 2024. GRANJA PORCINA. Producción de gas metano con biorreactores.

<https://agrotendencia.tv/agropedia/granjas-porcinas-produccion-de-gas-metano-con-biorreactores/>

Gonclaves Pedro Henrique 2024. Comparison of externalities of biogas and photovoltaic solar energy for energy planning.

<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0301421524000909>

IPS 2024. Instituto de Procesos Sostenibles. Universidad de Valladolid España.

<https://portaldelaciencia.uva.es/unidades/4694/tesis>.

Kuhn Dupont Gabriele 2023. Kinetic modelling and improvement of methane production from the anaerobic co-digestion of swine manure and Cassava bagasse.

<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S096195342300199X>

Krogsboll Morten 2023. A high efficiency gas phase photoreactor for eradication of methane from low concentration sources.

<https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1748-9326/ad0e33/pdf>

Lendomi Thomas 2022. Methane production and microbial community acclimation of five manure inocula during psychrophilic anaerobic digestion of swine manure.

<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0959652622004115>

Ma Chun 2022. Low dose acidification as a methane strategy for manure management.

MAPA 2024. Bases zootécnicas para el cálculo del balance alimentario de nitrógeno y de fósforo 2da edición.

https://www.mapa.gob.es/es/ganaderia/temas/ganaderia-y-medio-ambiente/porcino_blanco_2024_21-3-24subidoaweb_tcm30-440945.pdf

Milquez Sanabria Harvey Andrés 2021. Evaluación del potencial de producción de emtano con diferentes tipos de residuos sólidos y líquidos orgánicos rurales.

<https://repository.uamerica.edu.co/bitstream/20.500.11839/8318/1/6142402-2021-1-IQ.pdf>

NAP 2024. Nutrient requirements of swine. https://animalnutrition.org/nrc_reports

<https://nap.nationalacademies.org/catalog/13298/nutrient-requirements-of-swine-eleventh-revised-edition>

Neshat Soheli A. 2017. Anaerobic co-digestion of animal manures and lignocellulosic residues as a potent approach for sustainable biogas production.

<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1364032117307694>

Pexas Georgios 2023. Hotspots and bottleneck for the enhancement of the environmental sustainability of the pig systems, with emphasis on European pig systems.

<https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/37974286/>

Rojas García Fabiola 2017. La ciencia del suelo en el ciclo del carbono en México.

https://pmcarbono.org/pmc/publicaciones/Pol_Pub-Mayo-Agosto_2017.pdf

Saynes Santillan Vinisa 2016. Emisiones de gases de efecto invernadero en sistemas agrícolas de México. Pág. 83.

Segura Peñafiel María José 2024. Impacto ambiental de la producción porcina y estrategias para su mitigación.

<https://www.porcicultura.com/destacado/impacto-ambiental-de-la-produccion-porcina-y-estrategias-para-su-mitigacion>

Sobrino Odón 2024. Mejores técnicas disponibles para reducir las emisiones en la ganadería porcina. Webinar.

Valdez Vázquez Marisol. 2022. Influencia de la separación de agua residual porcina en fracciones sólida y líquida, en la producción de metano con lodo anaerobio granular y disperso.

<https://biotecnia.unison.mx/index.php/biotecnia/article/view/1537>

Wang Hui 2025. Bioenergy recovery and carbon emissions benefits of short-term bio-thermophilic pretreatment on low organic sewage sludge anaerobic digestion: A pilot-scale study.

<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1001074223003704>

Weber Bernd 2012. Producción de biogás en México. Estado actual y perspectivas.

https://sswm.info/sites/default/files/reference_attachments/WEBER%20et%20al%202012.%20Producci%C3%B3n%20de%20biog%C3%A1s%20en%20M%C3%A9xico.pdf

Zamora Morales Bertha Patricia 2017. Tecnologías del INIFAP con relación a la mitigación del cambio climático y la captura de carbono en el suelo.

https://pmcarbono.org/pmc/publicaciones/Pol_Pub-Mayo-Agosto_2017.pdf