

ESTIMACIÓN DEL POTENCIAL ENERGÉTICO DE BIOMASAS EN COLOMBIA.

**MAYKEL ILIAN MARULANDA CARDONA
MANUELA SALAZAR MOSCOSO**

**UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE PEREIRA
FACULTAD DE CIENCIAS AMBIENTALES
PEREIRA
2020**

ESTIMACIÓN DEL POTENCIAL ENERGÉTICO DE BIOMASAS EN COLOMBIA.

**MAYKEL ILIAN MARULANDA CARDONA
MANUELA SALAZAR MOSCOSO**

TRABAJO DE GRADO PARA EL TITULO DE ADMINISTRACIÓN AMBIENTAL

ALVARO IGNACIO RAMIREZ FAJARDO

**UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE PEREIRA
FACULTAD DE CIENCIAS AMBIENTALES
PEREIRA
2020**

NOTA DE ACEPTACIÓN

Firma del director del trabajo de grado

Estado del trabajo de grado:

Aceptado: Si _ No_ Laureado: Si_ No_

Agradecimientos:

La vida nos presenta muchas opciones, nosotros decidimos cuáles son las oportunidades. Quiero agradecer y dedicar este logro a mi Madre y hermano ya que han sido el motor para mantenerme fuerte ante cualquier adversidad, agradecer a cada persona que conocí y aportó tanto elementos positivos como negativos a mi vida para llegar a ser la persona quien soy, a mi amiga con la que realice esta investigación por ser la perfecta compañía en este proceso de formación profesional y personal, por último y no menos importante agradecer a la vida, a Dios si existe y al universo por ponerme en el lugar tan afortunado donde me encuentro ahora.

Adicionalmente quiero agradecer a todo el grupo de profesores con el que tuve la oportunidad de compartir y aprender de ellos, a mis compañeros y los pocos amigos que adquirí en el transcurso de este proceso de formación, Gracias por ser parte de una etapa tan maravillosa en mi vida.

Maykel Ilian Marulanda Cardona

Quiero agradecer a mi Dios por darme la oportunidad de superarme cada día de mi vida rodeada de gente maravillosa.

A mi familia por ser mi apoyo y mi inspiración, darme los recursos para cursar este pregrado. Todos y cada uno de los miembros de mi familia han sido pieza clave para formarme como persona y les estoy eternamente agradecida.

A mi amigo querido Maykel Marulanda por ser luz y sal en mi vida y mi apoyo incondicional. Finalmente a Mateo Sánchez por ser mi inspiración, mi compañero de vida, aquel que me impulsa a alcanzar mis sueños.

Manuela Salazar Moscoso

TABLA DE CONTENIDO.

1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.	10
2. JUSTIFICACIÓN.	12
3. OBJETIVOS.	14
3.1. OBJETIVO GENERAL	14
3.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	14
4. MARCO TEÓRICO-CONCEPTUAL.	15
5. DIAGNÓSTICO ENERGÉTICO DE COLOMBIA.	24
5.1. ESTADO ACTUAL DEL SECTOR AGROPECUARIO COLOMBIANO.	28
5.2. SECTOR AGRÍCOLA.	29
5.3. SECTOR PECUARIO.	31
6. MODELOS DE CÁLCULO DE GENERACIÓN DE METANO.	35
6.1. COMPOSICIÓN ELEMENTAL.	35
6.2. COMPOSICIÓN DE LA FRACCIÓN ORGÁNICA.	39
6.3. DEMANDA QUÍMICA DE OXÍGENO.	39
7. CARACTERIZACIÓN DE LA BIOMASA.	41
7.1. CAFÉ.	41
7.2. PALMA DE ACEITE.	44
7.3. BOVINOS.	49
7.4. PORCINOS.	50
8. POTENCIAL ENERGÉTICO.	53
9. CONCLUSIONES.	56
BIBLIOGRAFÍA	58

LISTA DE GRAFICOS

Grafico 1. Tasa de crecimiento relativo de microorganismos.	17
Grafico 2. Producción de biogás en función de la temperatura y el TRH.	19
Grafico 3. Dependencia de la actividad metanogénica en función del pH	20
Grafico. 4. Composición de la generación eléctrica de Colombia 2017.	26
Grafico. 5. Hectáreas cultivadas en la última década de Colombia.	30
Grafico 6. Porcentaje de hectáreas cultivadas por cultivo en el 2016.	30
Grafico 7. Distribución pecuaria de Colombia 2017	32
Grafico 8. Distribución pecuaria por departamentos 2017.	33
Grafico 9. Potencial energético de las biomásas agrícolas en Colombia.	55
Grafico 10. Potencial energético de las biomásas pecuarias en Colombia.	55

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Rangos de temperatura y tiempos de fermentación.	17
Tabla 2. Valores óptimos de pH.	19
Tabla 3. Concentración de sustancias inhibidoras.	21
Tabla 4. Generación eléctrica de Colombia por tipo de recurso 2016 – 2017.	25
Tabla 5. Residuos del proceso de beneficio de café (1.000 g de café cereza).	41
Tabla 6. Composición química de la pulpa de café.	43
Tabla 7. Comparación de la composición elemental de los residuos de palma de aceite.	46
Tabla 8. Comparación de la composición proximal de los residuos de palma.	46
Tabla 9. Comparación de la composición proximal de las fibras de los residuos de palma de aceite.	47
Tabla 10. Plantilla de cálculo de BMP para el raquis de palma de aceite.	48
Tabla 11. Plantilla de cálculo de BMP para la fibra de palma de aceite.	48
Tabla 12. Producción anual de estiércol bovino.	49
Tabla 13. Composición elemental de la excreta bovina.	49
Tabla 14. Plantilla de cálculo de BMP para la excreta bovina.	50
Tabla 15. Producción anual de estiércol porcino.	51
Tabla 16. Composición elemental de la excreta porcina.	51
Tabla 17. Plantilla de cálculo de BMP para la excreta porcina.	52

LISTA DE ECUACIONES.

Ecuación 1	18
Ecuación 2	35
Ecuación 3	36
Ecuación 4	36
Ecuación 5	36
Ecuación 6	37
Ecuación 7	37
Ecuación 8	37
Ecuación 9	38
Ecuación 10	38
Ecuación 11	38
Ecuación 12	39
Ecuación 13	40
Ecuación 14	40
Ecuación 15	42
Ecuación 16	44
Ecuación 17	50
Ecuación 18	53

LISTA DE MAPAS

Mapa 1. Generación de estiércol porcino año 2016	34
Mapa 2. Generación de estiércol bovino año 2016	34

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Producción de biogás por 100 kg de biomasa.

56

LISTA DE ANEXOS.

ANEXO A: CENSO-PORCINO-2017 (Adjunto Excel), ICA

ANEXO B: Atlas del Potencial Energético de la Biomasa Residual en Colombia (Página 163).

ANEXO C: Planilla de cálculo de BMP. (Adjunto Excel)

ANEXO D: CENSO-BOVINO-2017. (Adjunto Excel), ICA

ANEXO E: Atlas del Potencial Energético de la Biomasa Residual en Colombia (Página 169).

INTRODUCCIÓN.

Colombia es un país que a pesar de tener un gran potencial económico en diferentes variables de producción, transformación y consumo al ser un país en vía de desarrollo no cuenta con las suficientes investigaciones para adoptar ideas innovadoras que puedan aportar nuevas oportunidades al país, En este caso el país posee una gran producción bovina y agrícola la cual se destaca por su gran número de cabezas de ganado y su área total en cultivos como el café, la caña entre otros. Esta producción deja una gran cantidad de desperdicios que como en otros países pueden ser aprovechados de diferentes maneras siendo una de las más llamativas o conocidas como combustible sea en forma de gas, biodiesel o energía eléctrica.

A Través de esta investigación se quiere dar a conocer una estimación del potencial energético proveniente de los desperdicios nacionales agrícolas y bovinos transformándolos en metano para la producción de energía eléctrica buscando entablar cual sería el porcentaje de la demanda nacional cubierta en caso de optar por esta práctica, para ello es necesario seleccionar qué desechos en específico serán utilizados para este proceso además de realizar una investigación en bases de datos nacionales y usar cálculos matemáticos para lograr tal estimación. Por último, concluir socio-económicamente si es viable esta práctica en el país sin dejar de lado el beneficio ambiental que se da al ser aprovechados estos residuos.

RESUMEN.

El manejo de residuos sólidos, la poca diversidad en la generación de energía eléctrica, las emisiones de dióxido de carbono, entre otras son problemáticas latentes en el territorio colombiano, el estudio de Fuentes No Convencionales de Energía (FNCE) en el caso específico del biogás representan una oportunidad para llevar energía eléctrica a lugares de difícil acceso, generar empleos formales y dignos, así como desarrollar al máximo el potencial del campo, lo cual supone una gran alternativa para la economía agropecuaria. La nación cuenta con la biomasa necesaria para la implementación de grandes sistemas de captación y generación de biogás a partir de residuos orgánicos producto de la matriz agrícola (más de 249 cultivos registrados) y pecuaria (196.977.806 cabezas). Se estima una demanda anual del orden de 66,667 GW de los cuales solo el 1% corresponde a FNCE en donde la biomasa es la que tiene mayor participación con un 0,9%.

Al realizar el trabajo se llegó a la conclusión del gran potencial de esta tecnología, debido a la alta producción de biomasa (residuos) en el país en donde destacan las biomasas agropecuarias, específicamente el estiércol de vaca y la producción agrícola de la palma de aceite, estas con la capacidad de generar 16,68% de la demanda nacional, disminuyendo las emisiones de gases de efecto invernadero como metano y ácido sulfhídrico y los grandes impactos sobre la salud de los seres vivos.

Palabras clave: BIOGAS, BIOMASA, ENERGIA, POTENCIAL.

1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.

La República de Colombia y todos los países afrontan un gran reto: encontrar fuentes sustentables de energía. La nación se comprometió a reducir sus emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) en un 20% antes del 2030¹ en el Pacto Mundial de Cambio Climático (COP21), celebrado en diciembre del 2015 en París.

La necesidad inherente del país en diversificar su matriz de generación eléctrica se debe a las experiencias de años pasados, en 2016 el fenómeno del niño golpeó fuertemente el país ocasionando que la producción de las plantas térmicas superará la participación de las hidroeléctricas nacionales y a su vez aumentó las importaciones del recurso eléctrico de países como Ecuador, suscitando un alza del precio del KWh en el mercado nacional. Debido a esto se ha identificado la oportunidad de implementar Fuentes No Convencionales de Energía (FNCE) en el país y es aquí donde surge la necesidad de estimar el potencial de estas fuentes de energía.

Colombia es un país con vocación agrícola que no termina de aprovecharse, las biomásas post cosecha son desechadas sin pensar en sus usos productivos, al igual que el estiércol producido por el ganado y en especial del ganado bovino por su elevado contenido de metano y su número de cabezas en el país. Adicionalmente Colombia posee falencias en el aprovechamiento de residuos orgánicos a pesar de poseer un marco normativo bien constituido en manejo integral de residuos, este no es abordado en su totalidad.

A través de los años se han desarrollado diferentes formas de generar energía, cada una de estas formas puede traer nuevas oportunidades no solo de generación de energética sino de empleo, sin embargo un país como Colombia en donde los intereses políticos y económicos truncan el desarrollo tecnológico y la investigación, no ha sido posible plantear nuevas alternativas que además de brindar oportunidades o mejoras económicas permita generar menores impactos ambientales ocasionados por las hidroeléctricas, la extracción de petróleo, carbón, madera o gas natural.

Al ser Colombia un país con tantos vacíos de investigación, surge la pregunta en la que se basa el presente trabajo: ¿Cuál es el potencial energético que puede ser generado a través de procesos de biodigestión anaeróbica de biomasa residual agrícola y pecuaria? Esta duda surge con la necesidad que tiene el país de buscar

¹El Espectador [en línea]: Bogotá D.C 13, Julio, 2018. 1 secc. 1 p. Disponible en internet: <https://www.elespectador.com/noticias/medio-ambiente/colombia-ratifica-el-acuerdo-de-paris-sobre-el-clima/>.

alternativas de generación de energía las cuales se ajusten al perfil económico del país y a la vez permita introducir fuentes no convencionales con costos apropiados los cuales no requieren de una alta inversión comparado con otras fuentes o formas de energía.

2. JUSTIFICACIÓN.

La proposición de alternativas que busquen solucionar los conflictos ambientales a través de tecnologías ambientalmente apropiadas responde a un manejo científico de los recursos naturales, procesos e impactos que se dan dentro de la relación Ecosistemas-Culturas. En cuanto a esto, el ambiente es entendido como un sistema complejo, según García (2011) “es una representación de esa realidad, conceptualizada como una totalidad organizada, en la cual los elementos no son “separables” y, por tanto, no pueden ser estudiados aisladamente”².

De acuerdo con Sáenz (2007), el ambiente “se entiende como el sistema o estructura, resultante de las interacciones entre una población humana organizada en sociedad y los procesos ecosistémicos”³. Este sistema está compuesto por tres dimensiones: la cultura, la naturaleza y la dimensión socio-económica. Los componentes de la dimensión cultural son la simbología, las tradiciones, prácticas agrícolas y las tecnologías resultantes de la adaptación al medio; la naturaleza se compone de todos los elementos biofísicos del territorio, así como las especies que lo habitan y la diversidad genética; la dimensión socio-económica está compuesta por las organizaciones sociales conformadas dentro del área de estudio y las actividades económicas. Todo esto construye un ambiente, y sus interrelaciones determinan una problemática ambiental, la generación de energía a través de digestión anaeróbica es una clara muestra entre las tres dimensiones que componen el ambiente dado que toma como base las prácticas de producción de los campesinos, la implementación de nuevas tecnologías que impactarían socio-económicamente el territorio nacional.

Lo anterior resalta la importancia de abordar las problemáticas ambientales presentes en el territorio de manera integral; es necesario comprender el nivel de importancia de las dinámicas presentes en este y las interrelaciones que se dan a partir de cada una de las dimensiones.

La investigación sobre problemáticas ambientales genera la comprensión de las dinámicas del territorio, efectos de las actividades humanas en los ecosistemas locales, así como los efectos a largo plazo a nivel global. Todo esto busca encaminar los gobiernos y organizaciones sociales en las acciones de conservación y restauración ambiental, enfocados en la transformación de la cultura y las políticas públicas. Así entonces, desde perspectivas globales es importante resaltar las

² GARCÍA, Rolando. Interdisciplinariedad y sistemas complejos. Revista Latinoamericana de Metodología de las ciencias sociales. 2011, Primer semestre, Vol 1. p 66-101.

³ SAÉZ, Orlando. Las ciencias ambientales como nueva área del conocimiento. Bogotá: Digiprint, 2007. p. 33

problemáticas que se viven actualmente a nivel latinoamericano, estos países se rigen por distintos modos de producción y se presentan los estados de poder clásicos que son deficientes para el manejo de problemas sociales y ambientales.

3. OBJETIVOS.

3.1. OBJETIVO GENERAL:

Estimar el potencial de generación de biogás en Colombia mediante procesos de digestión anaeróbica de biomasa residual agrícola y pecuaria.

3.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS:

1. Establecer un marco teórico-conceptual sobre la generación de biogás a partir de biomasas residuales.
2. Construir un diagnóstico general de la demanda energética y producción de biomasa de café, palma de aceite, estiércol porcino y bovino.
3. Calcular el potencial energético de biogás con biomasa de café, palma de aceite, estiércol porcino y bovino en Colombia.

4. MARCO TEÓRICO-CONCEPTUAL.

Colombia es un país catalogado globalmente como un país en vía de desarrollo, este precedente permite explorar todo tipo de campo que brinde al país opciones de sustentabilidad en sus procesos productivos y en la calidad de vida. Por lo tanto, se considera de suma importancia explorar la generación del biogás proveniente de los residuos orgánicos de la producción, carne y leche nacional.

La generación del biogás se da a través de la digestión anaerobia, la cual durante millones de años los microorganismos anaerobios se han adaptado para transformar la materia orgánica biodegradable en biomasa celular, subproductos de las fermentaciones anaeróbicas o metabolitos, y una mezcla de compuestos gaseosos tales como metano (CH_4), dióxido de carbono (CO_2), y trazas de ácido sulfhídrico (H_2S), entre otros⁴. Esta reacción metabólica se lleva a cabo en diferentes etapas por la combinación de diferentes grupos de bacterias.

El proceso de generación inicia en un biodigestor el cual según El Manual del Biogás de la FAO⁵ en 2011: lo constituyen un reactor o contenedor de las materias primas a digerir; un contenedor de gas, con los accesorios para salida de biogás, entrada o carga de materias orgánicas primas y salida o descarga de materias orgánicas estabilizadas. La materia orgánica polimérica no puede ser utilizada directamente por los microorganismos a menos que se hidrolicen en compuestos solubles, que puedan atravesar la pared celular. La hidrólisis es el primer paso necesario para la degradación anaeróbica de sustratos orgánicos complejos. En la hidrólisis, las cadenas compuestas complejas de la materia orgánica presentes en la biomasa con gran número de átomos como los carbohidratos, lípidos y proteínas son hidrolizados por enzimas producidas por bacterias hidrolíticas dando como resultado cadenas más simples de aminoácidos, ácidos grasos, azúcares y alcoholes.

La siguiente etapa es la acidificación, los compuestos simples producidos en la etapa anterior son fermentados produciendo ácidos grasos simples como el ácido acético crucial en las siguientes etapas y pequeñas cantidades de hidrógeno, etanol y dióxido de carbono, esto debido a la acción de las bacterias acidogénicas. Las bacterias acetogénicas convierten los productos de la hidrólisis en acetato, hidrógeno y dióxido de carbono.

Por último, las bacterias metanogénicas usan estos productos para la formación de “biogás” el cual es una mezcla gaseosa de productos donde principalmente se

⁴ SIEVERS, Dennis y IANOTT, Eugenel. Buffer stability in manure digesters. En: Agric. Wastes 4 (1982), Georgacakis, Dimitris; Sievers p. 427–441

⁵ MINENERGIA, PNUD, FAO, GEF. Manual de Biogás. Santiago de Chile. 2011. No 1. p 115

encuentran el metano y dióxido de carbono. Se ha demostrado que un 70% del metano producido en los reactores anaeróbicos se forma a partir de la descarboxilación de ácido acético, a pesar de que, mientras todos los organismos metanogénicos son capaces de utilizar el H₂ como aceptor de electrones, sólo dos géneros pueden utilizar acetato. Los dos géneros que tienen especies acetotróficas son Methanosarcina y Methanothrix. El metano restante proviene de los sustratos ácido carbónico, ácido fórmico y metanol. El más importante es el carbónico, el cual es reducido por el hidrógeno, también producido en la etapa anterior⁶.

La temperatura es un factor sumamente importante en todo proceso biológico ya que influye en gran parte de los subprocesos, la velocidad de crecimiento de los microorganismos es directamente proporcional a la temperatura, como consecuencia la velocidad de las reacciones bioquímicas y por ende un aumento en la producción de biogás. La temperatura de operación es un factor necesario en el cálculo, diseño y control de un biodigestor, los cambios repentinos pueden ocasionar la muerte de las bacterias y es por esto que se hace necesario un monitoreo continuo de esta variable y un sistema que corrija en tiempo real las perturbaciones del sistema.

En la actualidad se clasifica el proceso de biodigestión en tres rangos de temperatura en los que se desarrollan las bacterias anaeróbicas, cada uno con una tasa de crecimiento característica (μ max) la cual es directamente proporcional a la temperatura y con valores óptimos de crecimiento⁷.

Determinar si una biomasa es viable para este proceso es posible gracias al cálculo del potencial bioquímico de metano o BMP por sus siglas inglés, es un valor teórico que se hace referencia a “la medida de la biodegradabilidad del sustrato determinada mediante el monitoreo de la producción acumulada de metano a partir de una muestra que se incubaba anaeróbicamente en un medio químicamente definido”⁸

Las biomásas consideradas para esta investigación según el contexto de Colombia hacen parte de los residuos orgánicos biodegradables pero específicamente los residuos producidos en la cría de animales para producción alimentaria y los residuos agrícolas, Estos residuos poseen un gran contenido de materiales orgánicos disueltos, en donde se destacan los Ácidos Grasos Volátiles (AGV), este

⁶ TELLO, Pab. Estudio de los efectos del pH extremo por adición de NaOH sobre la producción y calidad del biogás y otros parámetros de la digestión anaerobia urbana. Instituto Universitario del Agua y de las Ciencias Ambientales. Alicante. 2013.

⁷ PARRA, Brayan, et al. Influencia del pH sobre la digestión anaerobia de biorresiduos de origen municipal. Rev UDCA Actual Divulg Científica 2014; 17:553–62.

⁸ OWEN, William, et. al. Bioassay for monitoring biochemical methane potential and anaerobic toxicity. Water Research. 1979. Vol. 13(6), p .485-492. doi:10.1016/0043-1354(79)90043-5

contenido permite el fácil crecimiento de bacterias anaerobias que transformaran la biomasa en distintos gases especialmente en metano⁹.

Los tiempos de fermentación y temperatura óptimos varían según cada tipo de bacteria, hacer un promedio no es posible ya que el rango es amplio y puede variar entre 100 días a 15 °C o 10 días a 60°C. Para implementar un biodigestor es necesario estudiar los requerimientos de las bacterias como se observa en la tabla y grafico No.1.

Fermentación	Mínimo	Óptimo	Máximo	Tiempos de fermentación
Psychrophilica	4 - 10 °C	15 -18 °C	20 -25 °C	Sobre 100 días
Mesophilica	15 - 20 °C	25 - 35 °C	35 - 45 °C	30 - 60 días
Thermophilica	25 - 45 °C	50 - 60 °C	75 - 80 °C	10 - 15 días

Tabla 1. Rangos de temperatura y tiempos de fermentación.¹⁰

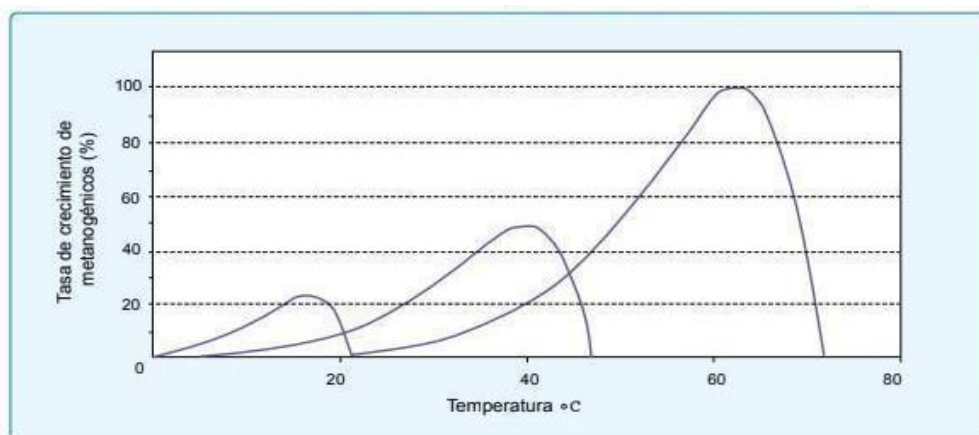


Gráfico 1. Tasa de crecimiento relativo de microorganismos (psicrofílico, mesofílico y termofílicos).¹¹

⁹ EASTMAN, John y FERGUSON, John. Solubilization of particulate organic carbon during the acid phase anaerobic digestion. J Wat Pollut Control Fed 53 (1981), p. 352-366

¹⁰ MINENERGIA, PNUD, FAO, GEF. Manual de Biogás. Santiago de Chile. 2011. No 1. p 115

¹¹ Ibid., p 115

El tiempo de retención hidráulico se define como el tiempo de estadía de la biomasa dentro del biodigestor y representa el parámetro constructivo más importante del dimensionamiento del reactor, el cual es determinado por la naturaleza del sustrato. La velocidad de carga es el volumen de sustrato introducido diariamente en el interior del reactor y es inversamente proporcional al tiempo de retención, dado que a medida que aumenta el tiempo de retención, menor es la cantidad de afluente introducido a diario.

Las bacterias requieren de un cierto tiempo para degradar la materia orgánica. La velocidad de degradación depende en gran parte de la temperatura; mientras mayor sea la temperatura, menor es el tiempo de retención o fermentación para obtener una buena producción de biogás¹².

La ecuación 1 presenta el cálculo del volumen de carga diario del biodigestor:

$$V_c = \frac{V_{bio}}{TRH}$$

Ecuación 1

Donde,

V_{bio} : Volumen del digestor.

TRH: Tiempo de retención hidráulico.

V_c : Velocidad de carga.

A continuación, en el gráfico 2 se muestra una gráfica que relaciona los tiempos de retención.

¹² Ibid., p 115

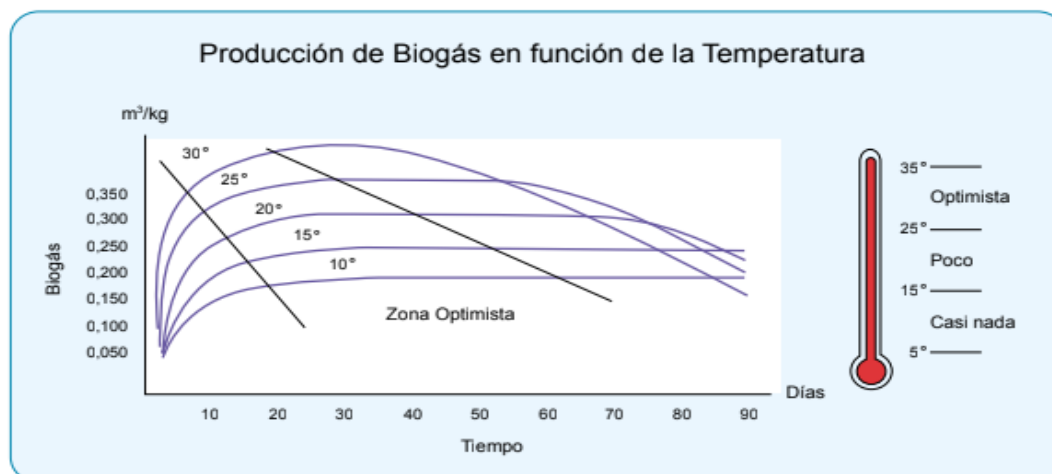


Grafico 2. Producción de biogás en función de la temperatura y el TRH.¹³

Como en todo proceso biológico el pH juega un papel fundamental para el desarrollo y generación de los seres vivos, en el caso de la digestión anaeróbica es difícil llegar a un valor puntual e ideal en el que se deba llevar a cabo este proceso debido al gran número de comunidades bacterianas participes en él, pero su mejor desarrollo se encuentra en la neutralidad, esto debido a que las bacterias metanogénicas son más sensibles a los cambios de pH.

ETAPA	RANGO DE pH
Acidificación	7.2 – 7.4
Acetogénicos	7.0 – 7.2
Metanogénicos	6.5 – 7.5

Tabla 2. Valores óptimos de pH.¹⁴

Para que el proceso se desarrolle satisfactoriamente, el pH no debe bajar de 6.0 ni subir de 8.0, el valor del pH en el digestor no sólo determina la producción de biogás sino también su composición. Una de las consecuencias de que se produzca un descenso del pH a valores inferiores a 6 es que el biogás generado es muy pobre en metano y, por tanto, tiene menores cualidades energéticas¹⁵. Un experimento llevado a cabo por la Universidad del Valle que consistía en regular el pH con NaHCO₃ al 4.0% y HCl 0.1N de muestras usadas en la generación de biogás, demostró: los resultados del PBM (potencial bioquímico de metano) muestran que el pH neutro fue el de mayor producción de metano y que los pH cercanos a 6.6 y 8.0 unidades fueron más favorables que los de 5.5 y 6.0 unidades.¹⁶

¹³ Ibid., p 115

¹⁴ Ibid., p 115

¹⁵ Ibid., p 115

¹⁶ XM S.A. Informe de operación del SIN y Administración del Mercado 2016. 2016.

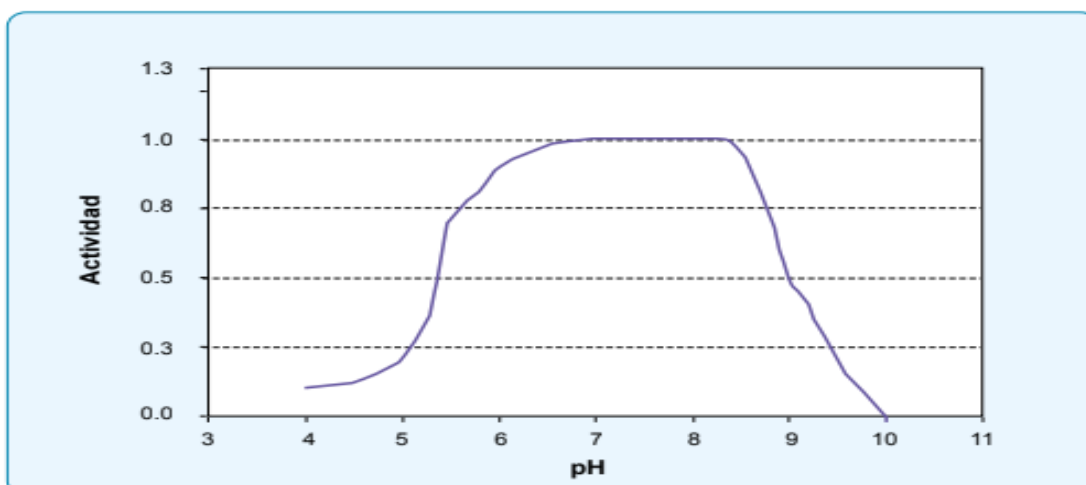


Gráfico 3. Dependencia de la actividad metanogénica en función del pH¹⁷.

Todo proceso biológico requiere de un balance de componentes para su desarrollo, en el caso de los procesos anaeróbicos se presenta la ventaja significativa ante los procesos aeróbicos en su baja necesidad de macronutrientes (entre las que destacan el carbono, nitrógeno y fósforo) y micronutrientes (calcio, boro, Magnesio, entre otros). Sin embargo, son factores muy relevantes a la hora de llevar a cabo un proceso de estos, ya que el carbono es la mayor fuente de alimento y energía de las bacterias metanogénicas, el nitrógeno es necesario para la formación de nuevas bacterias y el fósforo actúa como catalizador de esta reacción. Estas bacterias consumen 30 veces más carbono que nitrógeno, por lo que la relación óptima de estos dos elementos en la materia prima se considera en un rango de 30:1 hasta 20:1” y en cuanto al requerimiento de fósforo se tiene “La demanda de fósforo corresponde a 1/7 – 1/5 de la demanda de nitrógeno”¹⁸.

Esto con respecto a macronutrientes, pero se encuentra que pequeñas trazas de micronutrientes ayudan en la metabolización y desarrollo de los procesos anaeróbicos, tales como: “Los metales traza tales como hierro, cobalto, molibdeno, selenio, calcio, magnesio, zinc, cobre, manganeso, tungsteno y boro a niveles de mg /L y la vitamina B12 en niveles de µg/L, se ha encontrado que mejoran la producción de metano.”¹⁹

Del mismo modo como existen componentes que promueven y ayudan al desarrollo del proceso metanogénico, existen componentes que inhiben o intoxican el proceso. Estos valores se deben tomar como orientativos, puesto que las bacterias anaeróbicas presentan la capacidad de adaptarse después de un período de tiempo

¹⁷ MINENERGIA, PNUD, FAO, GEF. Manual de Biogás. Santiago de Chile. 2011. No 1. p 115

¹⁸ Ibid., p 115

¹⁹ Ibid., p 115

a condiciones que en un principio las afectaba severamente²⁰. Algunas de estas concentraciones son presentadas en la siguiente tabla:

INHIBIDORES	CONCENTRACIÓN INHIBIDORA
SO ₄	5000 ppm
NaCl	40.000 ppm
NO ₃ -	0.05 mg/ml
Cu	100 mg/ml
Cr	200 mg/ml
Ni	200-500 mg/ml
CN-	25 mg/ml
Na	3500-5500 mg/ml
K	2500-4500 mg/ml
Ca	2500-4500 mg/ml
Mg	1500-1500 mg/ml

Tabla 3. Concentración de sustancias inhibidoras²¹.

Existen diversas opciones para la utilización del biogás. Dentro de éstas destacan la producción de calor o vapor para usos industriales o climatización de espacios, generación de electricidad a pequeña o gran escala y bajo procesos de refinación se puede llegar a comercializar para uso de combustible de vehículos, refinación de hidrocarburos, residenciales, entre otros.

Las técnicas usadas en los sistemas de digestión anaeróbica para la producción energética se catalogan en 3 tipos de sistemas:

1. Pasivos
2. Baja velocidad
3. Alta velocidad

²⁰ MINENERGIA, PNUD, FAO, GEF. Manual de Biogás. Santiago de Chile. 2011. No 1. p 115

²¹ Ibid., p 115

El sistema pasivo generalmente se da en una especie de laguna cubierta puede ser por plástico de tipo PVC en donde no hay agitación, ni calefacción y son dependientes a las estaciones o al clima de la zona donde esté ubicado, los sistemas de baja velocidad son aquellos con un mejor diseño en donde no se da la agitación pero cabe la posibilidad de brindar temperatura estimulando una mayor producción de biogás, por último el sistema de alta velocidad es aquel con mejor diseño interior y exterior, algunos poseen la capacidad de recirculamiento del gas para una mejor producción, en este se aplica la agitación constante y la estimulación de bacterias a través del pH y la temperatura.²²

En temas de viabilidad existen diferentes estudios de casos en distintas escalas y con variados tipos de residuos; en Brasil existe un gran potencial de residuos orgánicos derivados de la cría de cerdos por lo que se dio un estudio de caso que buscaba analizar la viabilidad de la producción de biogás transformada a energía eléctrica en donde se incluyen valores tanto de instalación del sistema de producción de biogás, la depreciación de este sistema, los costos de mantenimiento (incluyendo la mano de obra). Esta investigación realizada en una escala media-baja debido al número de cabezas de cerdo (2300) dio como resultado que es posible la autosuficiencia energética de la granja productora y que sería posible una ganancia económica en una escala productiva mayor a la propuesta o a la vez una inversión mayor en el generador de energía para producir excedentes y lograr una retribución económica.²³

Otra investigación situada en Cundinamarca, Colombia, desarrollada a una escala pequeña a partir de las excretas del ganado bovino para generar un sistema sostenible, esta investigación es orientada a verificar la viabilidad para el autosustento energéticos tanto en forma de energía eléctrica como de biogás, a través de un presupuesto de inversión y un monitoreo a la producción y recolección de residuos se concluyó que no es viable debido a la poca producción de residuos que brindaban las 14 cabezas de ganado que tenía la finca en ese momento.²⁴

En el 2017 se desarrolló una investigación de viabilidad del biogás a partir de residuos pecuarios y agroindustriales generados en el municipio de Tibana, Boyacá; esta cuenta con un área total de 121.76 Km², Tibana es conocida en Colombia como “La cuna de la ganadería” además de que en sus tierras se dan cultivos de plátano,

²² LÓPEZ, Fernando, et al. Aprovechamiento energético del residuo ganadero. Badajoz: Agencia Extremeña de la Energía, 2014. P 24-36

²³ CERVI. Ricardo; ESPERANCINI, Maura y BUENO, Osmar. Viabilidad Económica de la Utilización de Biogás para la Conversión en Energía Eléctrica. São Paulo: Univ. Estadual Paulista, 2011.

²⁴ BUITRAGO, Luz; MARINED, Jhoana y ROSADO, Yaneth. Viabilidad económica para la producción de biogás a partir de residuos orgánicos, mediante tecnología de biodigestores, para ser usado como combustible en la cocción de alimentos y generación de electricidad en la Finca las Eusidias ubicada en el municipio de Sylvania Cundinamarca Bogotá: Universitaria Agustiniiana. 2019.

café, caña de azúcar, guayaba, yuca, arracacha, aguacate, naranja, mandarina, guama, etc. Este municipio cuenta aproximadamente con más de 100.000 animales distribuidos entre vacas, cerdos, pollos de engorde, entre otros siendo una producción a gran escala. La propuesta de esta investigación es desarrollar un biodigestor para procesar y generar biogás, abono y energía eléctrica para el autoconsumo y a la vez la generación de ganancias económicas.

La investigación realizada en una escala mayor a las mencionadas anteriormente evalúan la viabilidad incluyendo todo tipo de inversión desde los gastos que se dan en la instalación y mantenimientos, se realizan varios flujos de caja para evaluar el Valor Presente Neto y La Tasa Interna de Retorno dando como resultado que no es viable a mediano y corto plazo ya que es una gran inversión inicial la que debe ser realizada y las ganancias se darían a partir del cuarto año por lo tanto se obtendrán ganancias a partir de un largo plazo o periodo desde que inicie el funcionamiento del biodigestor.²⁵

²⁵ GOMEZ, Esther; RODRIGUEZ, José y TORRES, Angela. Implementación de un biodigestor para el aprovechamiento de los residuos de las granjas porcinas en el municipio de Tibana. Bogotá: Universidad Católica de Colombia.2017.

5. DIAGNÓSTICO ENERGÉTICO DE COLOMBIA.

La generación de energía eléctrica en Colombia durante los últimos 5 años ha presentado en general una evolución creciente. Específicamente para el año 2017, la generación se situó en 66,667.01 GWh, un 1.1 % superior al valor registrado en 2016. Se resalta que para el año 2016 se presentó descenso en el crecimiento de la generación. El 2017 en Colombia, fue un año que estuvo marcado por normalidad hidrológica, haciendo que la generación estuviese basada en gran medida por el recurso hídrico, el cual es el recurso más abundante en Colombia²⁶.

El ministerio de energía de Colombia posee registros sectorizados de la demanda de los diferentes tipos de energía utilizados en el país para el desarrollo de todo tipo de actividades, gracias a estos registros tan bien elaborados se puede destacar que Colombia en términos hidrológicos normales (Fenómenos del niño y/o la niña) es un país independiente en la generación de energía; tanto que es exportador de esta a países como Ecuador y Venezuela y busca a mediano plazo exportar energía a Panamá y Chile.²⁷

En cifras se reporta que en el 2019 Colombia tuvo la mayor demanda de energía registrada desde 2015, presentándose en el tercer trimestre del año un consumo de 18,454 GW/h, adicionalmente cabe destacar que la demanda energética Colombiana se ha sostenido desde el 2017.²⁸ Sin embargo, esto no es del todo bueno, en el año 2016 el fenómeno climático del niño golpeó fuertemente el país, ocasionando que durante el primer trimestre de este año la participación de la generación térmica superará en el cubrimiento de la demanda a la hidráulica con una participación del 48.6% vs 47.6% de la demanda nacional y a su vez aumentó las importaciones del recurso energético de países como Ecuador²⁹.

²⁶ XM S.A. Informe de operación del SIN y Administración del Mercado 2017. 2017

²⁷ MINENERGIA, UPME, BALANCE ENERGÉTICO COLOMBIANO - BECO. [https://www1.upme.gov.co/] Bogotá. [Consultado: 2 de Septiembre de 2020]. Disponible en: <https://www1.upme.gov.co/InformacionCifras/Paginas/BalanceEnergetico.aspx>

²⁸ Portafolio, Demanda de energía en 2019, la más alta del país desde 2015. En: Periodico Portafolio. Bogotá, Enero 20 de 2020. [Consultado: 2 de septiembre de 2020]. Disponible en: <https://www.portafolio.co/economia/demanda-de-energia-en-2019-la-mas-alta-del-pais-desde-2015-537280>

²⁹ XM S.A. Informe de operación del SIN y Administración del Mercado 2016. 2016

Generación (GWh)	2016	Participación (%)	2017	Participación (%)	Variación 2017 vs 2016
Generación fuentes de energía No Renovables					
Combustible fósil	18494.64	28%	8682.86	13%	-53.1%
Total No Renovables	18494.64	28%	8682.86	13%	-53.1%
Generación fuentes de energía Renovables					
Biomasa	598.09	0.9%	632.8	0,9%	5.8%
Eólica	50.89	0.1%	3.07	0,0%	-94.0%
Hidráulica	46798.55	71%	57342.8	86%	22.5%
Solar	-	-	5.39	0,0%	-
Total Renovable	47447.53	72%	57984.1	87%	22.2%
Total general	65942.17	100%	66667.01	100%	1.1%

Tabla 4. Generación eléctrica de Colombia por tipo de recurso 2016 – 2017³⁰.

³⁰ XM S.A. Informe de operación del SIN y Administración del Mercado 2017. 2017

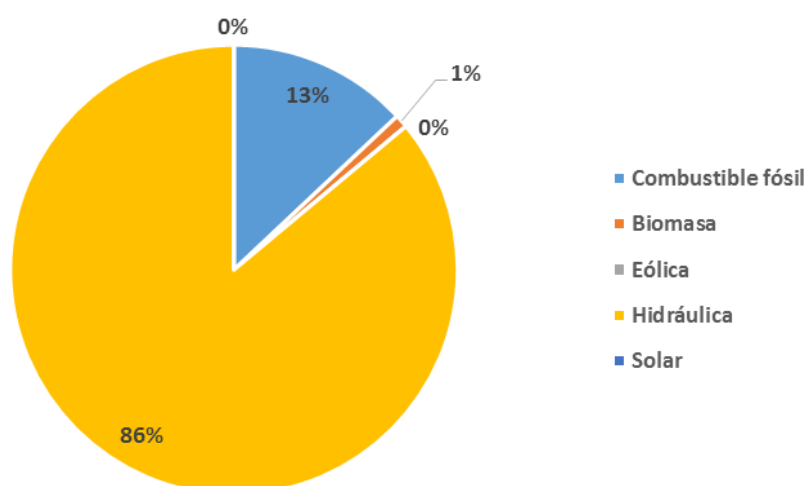


Grafico. 4. Composición de la generación eléctrica de Colombia 2017.³¹

Teniendo en cuenta las actuales circunstancias nacionales relacionadas con temas como el crecimiento poblacional, los retos financieros y económicos, la sostenibilidad ambiental de nuestros recursos y las nuevas dinámicas del clima en Colombia, se hace necesario pensar en una política energética que formule estrategias para construir escenarios de abastecimiento diversificado, en el marco de la promoción de la seguridad energética, el uso racional y eficiente de los recursos y la inteligencia regional. En este sentido y con el fin de reducir los riesgos ocasionados por la dependencia de las fuentes energéticas poco amigables con el medio ambiente, se debe avanzar en la realización de inventarios del potencial de fuentes renovables, la evaluación del desempeño de sus aplicaciones y la determinación de las condiciones óptimas para su aprovechamiento, que coadyuven decididamente a satisfacer las necesidades de la población y permitan un ritmo sostenible de crecimiento económico.³²

La biomasa es una de estas apuestas que realizan los gobiernos a nivel mundial, ya que posee un gran potencial energético y bajo ciertos escenarios se presenta como una alternativa al manejo de residuos sólidos, solucionando de esta manera dos problemáticas mundiales como lo son la seguridad energética y las emisiones de CO₂ causantes del cambio climático³³.

³¹ XM S.A. Informe de operación del SIN y Administración del Mercado 2017. 2017

³² ESCALANTE Humberto, et. al. Atlas del potencial energético de la biomasa residual en Colombia. 1 ed. Bucaramanga. Universidad Industrial de Santander. 2011. 180p. ISBN: 9789588504599

³³ Unidad de Planeación Minero-Energética. Potencialidades de los cultivos energéticos y residuos agrícolas en Colombia. Bogotá D.C: Ministerio de Minas y Energía. 2002. 20 p

La utilización de la biomasa, frente a los hidrocarburos, presenta ventajas comparativas que la hacen atractiva para su utilización en procesos de generación de energía, térmica, motriz o eléctrica, bien sea en sistemas centralizados, en sistemas de generación de energía distribuida o para zonas no interconectadas, entre estas ventajas podemos enunciar:

- a)** Optimización de la cadena productiva, aprovechando residuos agrícolas o agroindustriales con poca o nula utilización, dándole un valor agregado al proceso productivo agrícola o agroindustrial.
- b)** Eliminación de residuos potencialmente contaminantes o con altos costos de disposición, se reduce la demanda de áreas para rellenos sanitarios o tratamiento de residuos.
- c)** Disminución de la demanda de combustibles fósiles y reducción de la emisión de CO₂ y otros contaminantes, originados en la utilización de combustibles fósiles.
- d)** Impulso al crecimiento del sector agrícola por el crecimiento de la demanda de combustibles provenientes de cultivos energéticos y residuos agroindustriales y por la creación de nuevos mercados.
- e)** Impulso al crecimiento del sector forestal con la creación de nuevos mercados para productos forestales y residuos agroindustriales.
- f)** Apoyo a las labores de conservación de suelos y cuencas mediante la creación de bosques energéticos con fines protectores/productores.
- g)** Creación de nuevas fuentes de empleos estables, en actividades que demandan mano de obra no calificada, de manera permanente, en actividades agrícolas, industriales y forestales.

Colombia durante el gobierno de Juan Manuel Santos se creó la ley 1715 de 2014, en la cual se establecen una serie de beneficios para aquellas personas o empresas que implementen FNCE, esta política se enmarca principalmente ventajas financieras sobre impuestos de importación de equipos, pago de renta y otros impuestos.

A pesar de todos estos puntos favorables también se presentan una serie de desventajas, son varios los factores por los cuales los proyectos de uso de la biomasa y residuos agroindustriales con fines energéticos, no se ven como una oportunidad inmediata de inversión o fuente de energía evidente para los agentes del sector, entre los cuales se identificaron los siguientes:

- a) Desconocimiento de la potencialidad de los cultivos energéticos y residuos agrícolas por parte del sector productivo.
- b) Costos de la energía: bajo costo de la energía eléctrica en el SIN.
- c) Problemas nacionales y sectoriales asociados al desempeño de la economía y seguridad.
- d) Subsidio a los combustibles en ZF y ZNI, estos hacen poco viable este tipo de proyectos.
- e) Tecnologías de transformación incipientes o sin aplicación en el país.
- f) Investigación y desarrollo, la disminución de los presupuestos en investigación y desarrollo por parte del estado.
- g) Disponibilidad y acceso a la información: la información existente de investigación básica (especies, producción, rendimientos, etc.) y estadísticas del sector agrícola y forestal es incompleta y desactualizada.

5.1. ESTADO ACTUAL DEL SECTOR AGROPECUARIO COLOMBIANO.

La economía colombiana se basa, fundamentalmente, en la producción de bienes primarios para la exportación, y en la producción de bienes de consumo para el mercado interno. Una de las actividades económicas más tradicionales es el cultivo de café, siendo uno de los mayores exportadores mundiales de este producto³⁴ y uno de los más estudiados gracias a empresas como Cenicafé que han generado grandes aportes científicos a través del descubrimiento de aplicaciones de las propiedades del café.

El sector agropecuario es uno de los grandes protagonistas en la economía nacional, según las cifras del informe del último trimestre del 2019 del Departamento Administrativo Nacional de Estadística (DANE), el sector tuvo un alza del 1.5% anual. Este impacto se debió al aumento de 1.4% en cultivos agrícolas transitorios y permanentes, por su parte la ganadería sufrió un impacto negativo decreciendo 0.3% lo que ratifica que el agro es protagonista en la economía nacional y su impacto en el PIB, además los indicadores de cifras de comercio exterior, producción, área sembrada, comercialización, empleos generados y colocación de crédito, entre otros temas. Entre 2010 y 2017, el comportamiento del PIB agropecuario registró un crecimiento de 25% en el valor, al pasar de \$47.1 billones a \$58.9 billones. Las variaciones del indicador pasaron de 0.2% al inicio del Gobierno del presidente Juan Manuel Santos a 4.92% el año pasado³⁵.

³⁴ Colombia.com. Economía. Colombia. Com.2018. Disponible en internet: <https://www.colombia.com/colombia-info/informacion-general/economia/>.

³⁵ MinAgricultura. El sector agropecuario mantiene un crecimiento positivo con una variación de 2% en el primer trimestre de 2018. Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural Disponible en

Según el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales de Colombia (IDEAM) en la cartilla Inventario Nacional de Gases de Efecto Invernadero (GEI) de Colombia en el año 2012 el país generó 178.4 Mton de CO₂, en donde la actividad pecuaria produce el 13.34% y el sector energético es causante de 13.73 %, en donde cabe resaltar que la gestión de estiércol generó 556.4 kton de CO₂.

Adicional al daño generado al medio ambiente es de suma importancia mencionar que la gestión de estiércol genera un gran impacto en la salud de los seres vivos, un estudio realizado por el gobierno de los Estados Unidos en el estado de Iowa, reveló que los habitantes que residen a 3.2 km de instalaciones de cría de animales reportaron una incidencia de síntomas de enfermedades infecciosas como la diarrea, el vómito, deshidratación, entre otras, estas en comparación con personas que no vivían cerca de una de estas instalaciones (en particular problemas respiratorios)³⁶, otro riesgo de enfermedades para la población humana es el consumo de agua contaminada con: 1) estiércol conteniendo bacterias patógenas y la más común es *Escherichia Coli* que causa diarrea y gases abdominales; 2) contenidos altos de nitratos que reducen la capacidad de transporte de oxígeno en la sangre, conocida como metahemoglobinemia; 3) hormonas, principalmente estrógenos, relacionadas con una reducción en la cantidad de esperma en humanos, adicionalmente las excretas bovinas frescas esparcidas en áreas de cultivo contienen nitrógeno en forma de nitratos y nitritos; la forma de acumulación de estos compuestos oxidados en el cultivo puede causar intoxicación en el ganado que los consuma³⁷, estos son apenas unos de los posibles daños ocasionados a la salud de los seres vivos, es por esto que se hace fundamental la gestión adecuada y propicia de estos residuos.

5.2. SECTOR AGRÍCOLA.

Según el portal del Ministerio de Agricultura colombiano (Agronet), Colombia registró en el 2016 un total de 4,865,083.77 hectáreas sembradas en todo el territorio nacional, produciendo un total de 51,580,424.3 toneladas entre más de 250 cultivos agrícolas (Ver anexo D).

internet: <https://www.minagricultura.gov.co/noticias/Paginas/El-sector-agropecuario-mantiene-un-crecimiento-positivo-con-una-variación-de-2-en-el-primer-trimestre-de-2018.aspx>.

³⁶ ICA. Censo Pecuario Nacional - 2017. 2018.

³⁷ RODRIGUEZ, Rafaela, et.al. Comparative analysis of methods and models for predicting biochemical methane potential of various organic substrates. ScienceDirect [online]. 14, febrero, 2019. Science Total Environ 2019;649:1599–608. doi:10.1016/j.scitotenv.2018.08.270.

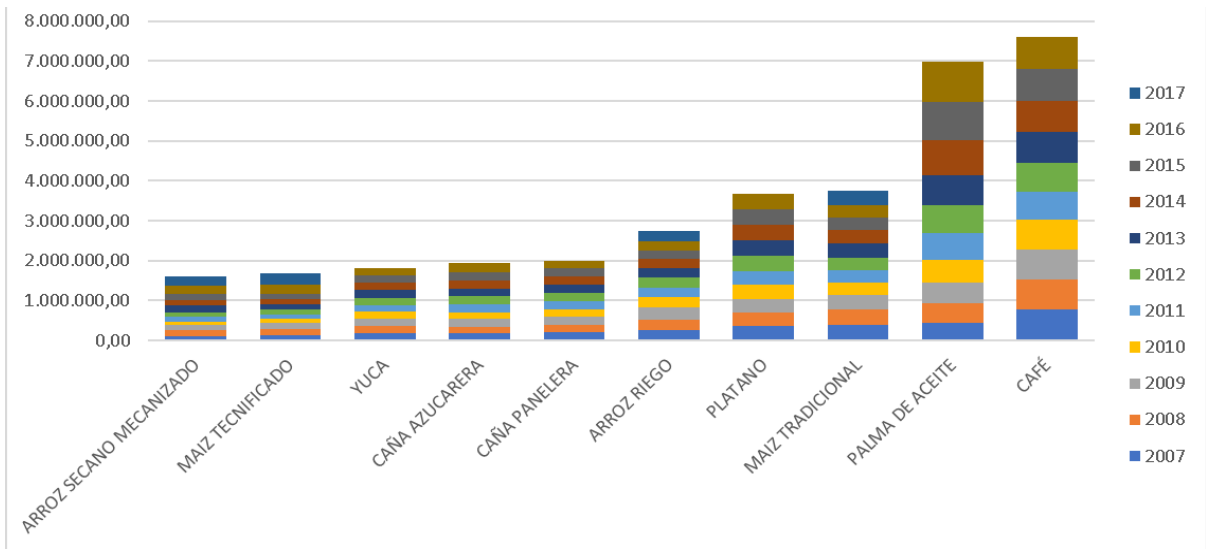
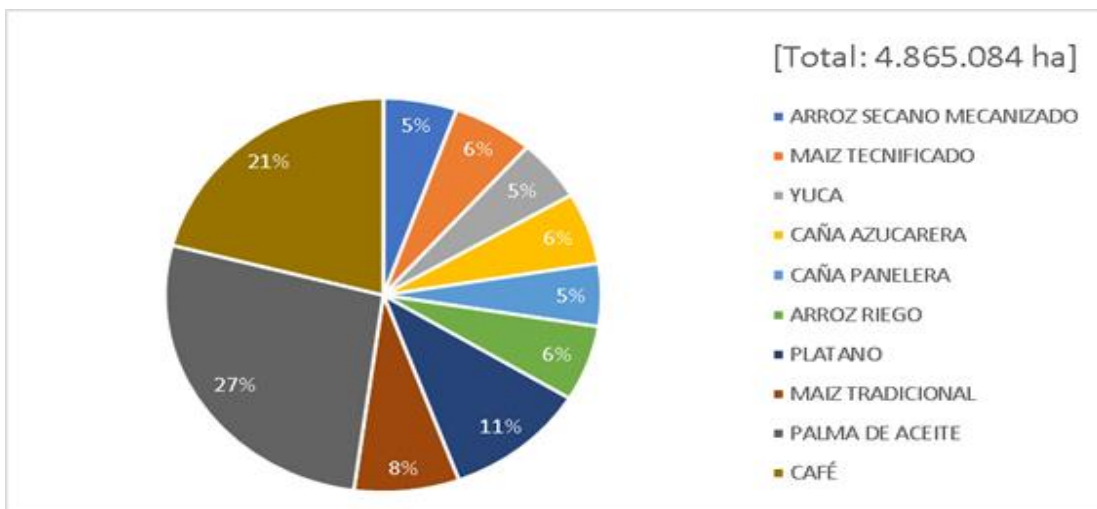


Grafico. 5. Hectáreas cultivadas en la última década de Colombia.³⁸

Al echar un vistazo encontramos que el café y la palma de aceite son las plantaciones más cultivadas en la última década del país, con un total de 7,590,087.12 hectáreas para el caso del café y 6,969,225.91 hectáreas para la palma de aceite; el café por su parte presenta un comportamiento fluctuante y que tiende a la baja, sin embargo sigue teniendo un gran protagonismo en la economía nacional y el gobierno lucha día a día con los caficultores nacionales para promover e incentivar esta actividad. La palma de aceite por su parte es un cultivo en auge debido al alto rendimiento que presenta, hasta el punto que para el año 2016 fue el cultivo con más hectáreas sembradas en el territorio nacional llegando a la suma de 1,000,051.88 ha. Por esta razón se realizará el análisis de estos dos cultivos.



³⁸ Ministerio de Agricultura de Colombia, Agronet. 2016

5.3. SECTOR PECUARIO.

Colombia cuenta con una gran diversidad de fauna y flora a lo largo de su territorio, esto debido a que cuenta con una variedad de pisos térmicos, desde nevados hasta desiertos, cruzando por selvas tropicales, páramos, costas, sabanas, etc. Esto permite que su actividad pecuaria sea extensa, contando con gran cantidad de especies animales, con una gama igual de extensa de usos como lo son: la carne, leche, ponedoras de huevos, lana, arado, exposición, entre otros. El Instituto Colombiano Agropecuario (ICA) en año 2019 genera un informe de las subespecies presentes en el territorio nacional:

La Población Bovina, a través de un caso de estudio, en el país está distribuida en 623,794 predios y constituida aproximadamente por 27,234,027 animales, Por otro lado Colombia cuenta con una población porcina de 5, 327,460 animales distribuidos en 234,883. Así mismo, la población bufalina es de alrededor de 308,580 animales distribuidos en 4,007 predios.

Colombia cuenta con reconocimiento internacional por sus especies caballar, mular y asnal, de exposición, deporte y trabajo, equino de paso fino, trote, trocha o galope, ejemplar de coleo, carreras o tiro y mular y asnal de labor, suman una población de 1,603,679 asentadas principalmente en los departamentos de Antioquia, Tolima, Córdoba y Cundinamarca.

Hecho similar ocurre con la especie caprina que registra tan solo 1,140,466 animales en el territorio nacional, población concentrada en el departamento de La Guajira donde se contabiliza el del 80.83 % de la población censada, seguido por Santander con un 5.45 %.

Según el censo pecuario del ICA en el año 2019 se tuvo una población total de 6,473,525 cabezas de cerdo, distribuidas principalmente en Antioquia y Valle del Cauca con 29.68% y 14.36% respectivamente. (Ver anexo A)

³⁹ Ministerio de Agricultura de Colombia, Agronet. 2016

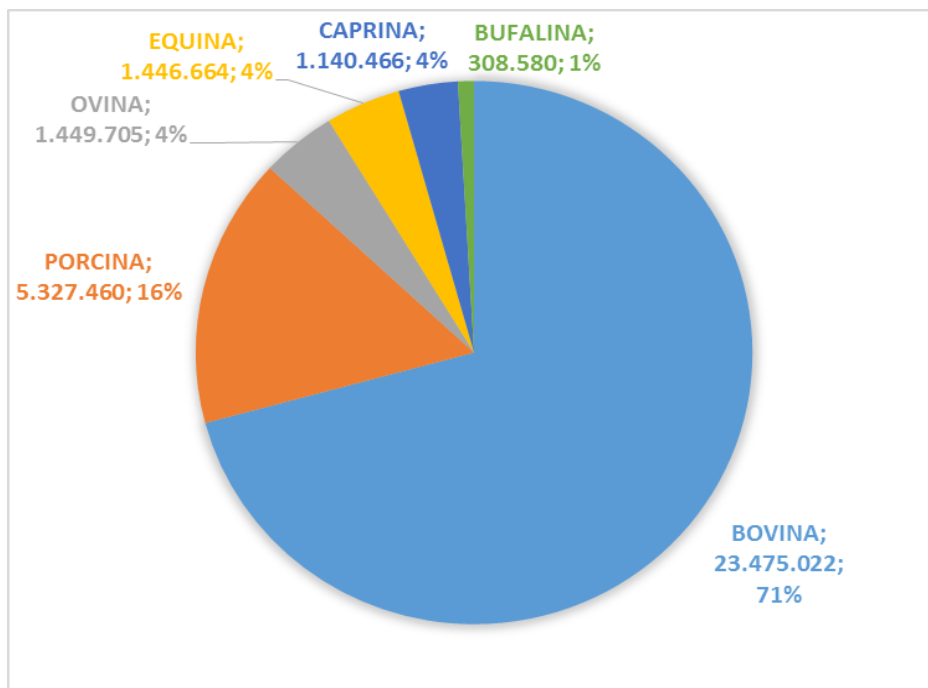


Gráfico 7. Distribución pecuaria de Colombia 2017.⁴⁰

Con base en el gráfico anterior podemos observar que las poblaciones pecuarias han tenido un incremento entre el 2017 y el 2019, aunque sugiere un punto positivo en la economía nacional en términos de mayor producción, a la vez este aumento en el número de cabezas son una muestra del impacto generado al ambiente tales como el calentamiento global, la contaminación de los suelos, el aire y fuentes hídricas. El crecimiento de la población pecuaria en más de 5 millones de cabezas en tan solo 2 años se interpreta a una mayor producción de estiércol la cual no está siendo aprovechada.

Para la selección de las biomásas, se puede apreciar que el mayor número de cabezas entre los mamíferos, corresponde en primer lugar a los bovinos que suman 23,475,022 y en segundo lugar los porcinos con un total de 6,473,525 lo que simboliza una gran cantidad de excretas las cuales generan una alta emisión de GEI's y que si no se someten a un debido manejo terminan siendo focos de enfermedades y plagas⁴¹. Es prudente en el ámbito académico estudiar estas biomásas y generar alternativas de uso.

⁴⁰ICA. Censo Pecuario Nacional 2019. 2020

⁴¹ ICA. Censo Pecuario Nacional - 2017. 2018.

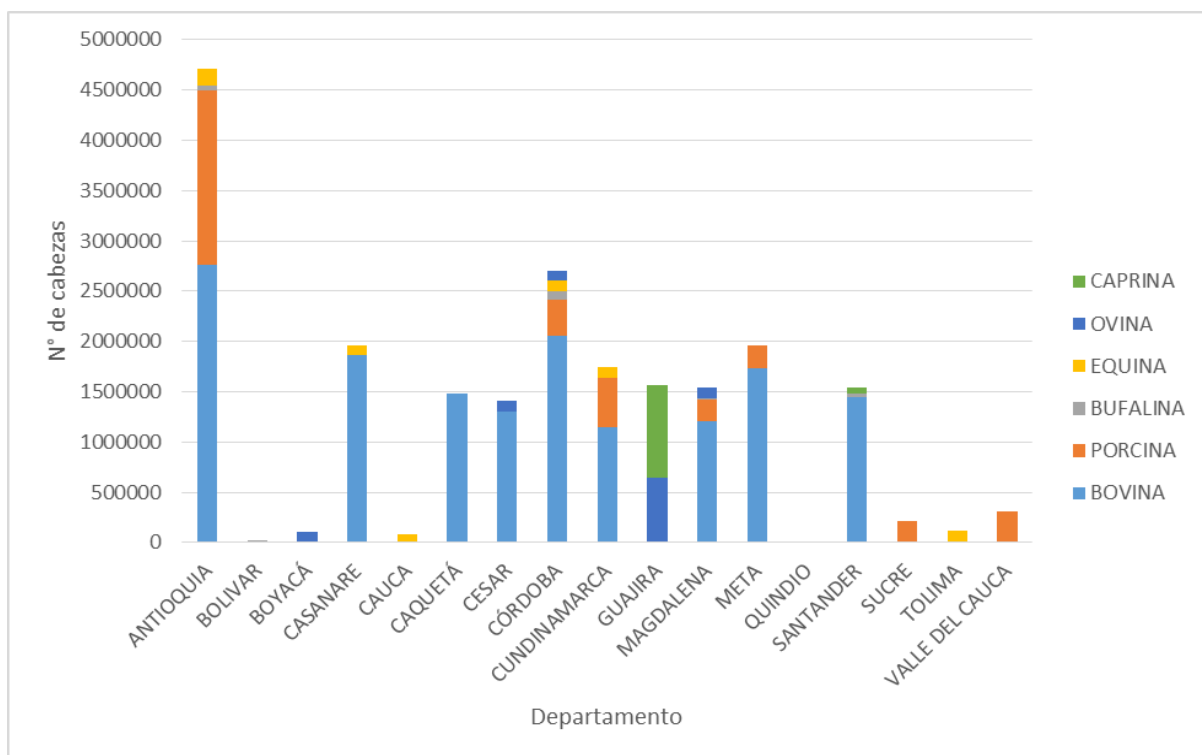
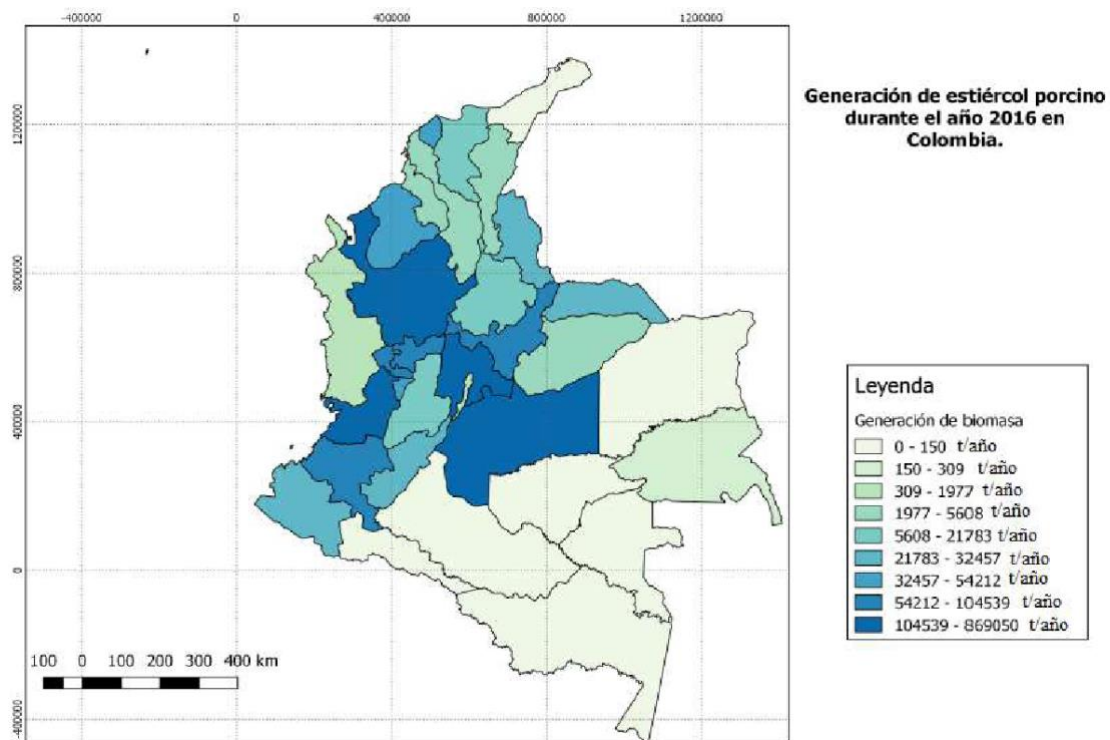
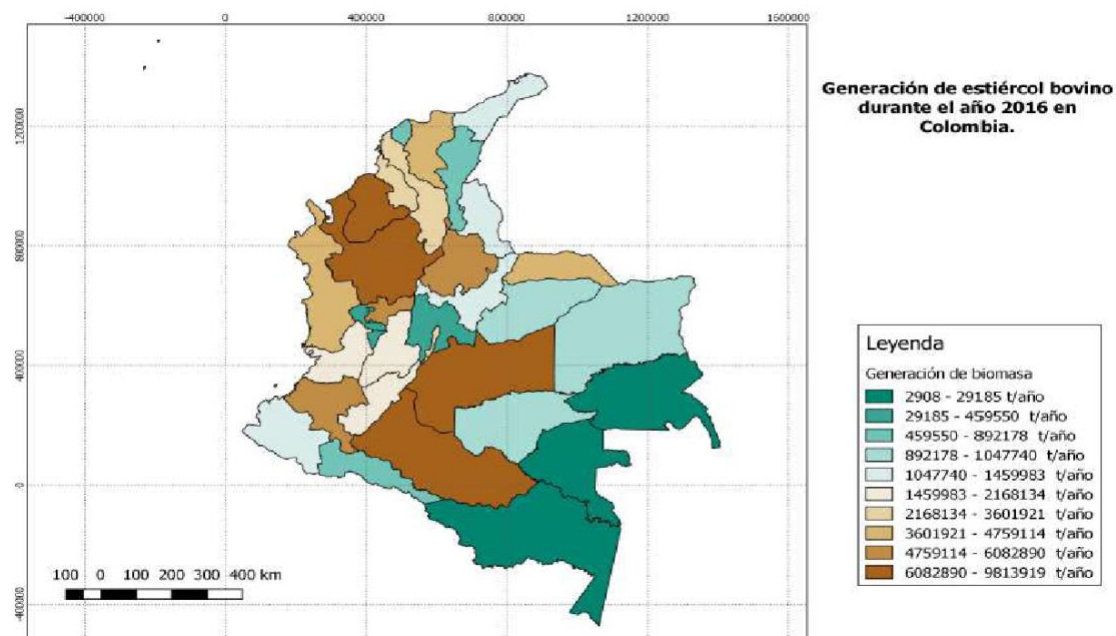


Grafico. 8. Distribución pecuaria por departamentos 2017.

El informe final del Grupo de Investigación en Procesos Químicos y Bioquímicos de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional de Colombia, en compañía con el Centro de Desarrollo Industrial TECSOL sobre el potencial de conversión del país a energía limpia por medio de biomasa residual (2018), entrega datos importantes para la investigación en materia de inventarios de biomasa por zonas del país y la estimación de la producción de las mismas, Los mapas que se presentan a continuación brindan información sobre dos de las biomásas de origen animal con mayor producción en el país y con mejores condiciones para procesos de digestión anaerobia dadas sus características de composición y disponibilidad.



Mapa 1. Generación de estiércol porcino año 2016⁴²



Mapa 2. Generación de estiércol bovino año 2016⁴³.

⁴² Grupo de Investigación en Procesos Químicos y Centro de Desarrollo Industrial TECSOL. Estimación del Potencial de Conversión a Biogás de la Biomasa en Colombia y su Aprovechamiento. Informe final. Bogotá D.C: Universidad Nacional de Colombia. Bioquímicos de la Facultad de Ingeniería. 2018. 216p.

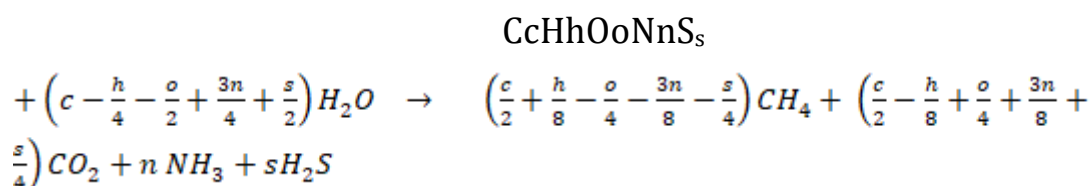
⁴³ Grupo de Investigación en Procesos Químicos y centro de desarrollo industrial TECSOL. Estimación del Potencial de Conversión a Biogás de la Biomasa en Colombia y su

6. MODELOS DE CÁLCULO DE GENERACIÓN DE METANO.

El potencial bioquímico de metano (BMP) se define como la máxima producción de metano en el estado estable de un biodigestor anaeróbico⁴⁴. Los métodos que se presentan a continuación están diseñados para determinar el BMP de un sustrato específico a partir de su caracterización de DQO (Demanda Química de Oxígeno), composición elemental o composición de fracción orgánica para obtener resultados confiables y con una trazabilidad teórica. Estos métodos se aplican considerando que toda la materia orgánica está degradada. El potencial de metano se expresa como ml CH₄ en condiciones estándar de temperatura y presión por la cantidad de material orgánico agregado (SV). El potencial bioquímico de metano (BMP) se calcula a partir de la composición elemental de una biomasa, sin embargo puede ser calculado mediante la DBO o incluso por porcentaje de lípidos, carbohidratos y proteínas. El resultado más preciso es a través de la composición elemental y además es la más común entre los autores.

6.1. COMPOSICIÓN ELEMENTAL.

La ecuación de Boyles describe el comportamiento de los diferentes compuestos generados durante la digestión anaeróbica por medio del estudio estequiométrico de su composición atómica (CHONS), estima la generación de metano (CH₄), dióxido de carbono (CO₂), azufre (S) y amoníaco (NH₃), por medio de la siguiente expresión:



Ecuación 2

Aprovechamiento. Informe final. Bogotá D.C: Universidad Nacional de Colombia. Bioquímicos de la Facultad de Ingeniería. 2018. 216p.

⁴⁴ RODRIGUEZ, Rafaela, et.al. Comparative analysis of methods and models for predicting biochemical methane potential of various organic substrates. ScienceDirect [online]. 14, febrero, 2019. Sci Total Environ 2019;649:1599–608. doi:10.1016/j.scitotenv.2018.08.270.

$$BMP_{th} = 22.4 \frac{\left(\frac{c}{2} + \frac{h}{8} - \frac{o}{4} - \frac{3n}{8} - \frac{s}{4}\right)}{12c+h+16o+14n+32s}^{45}$$

Ecuación 3

La determinación de la composición elemental es relativamente rápida para todos los componentes, sin embargo, esta ecuación no hace diferencia entre materia biodegradable y no biodegradable y que parte de la materia orgánica es usada por las bacterias para su crecimiento la cual no aporta al valor teórico del BMP.

La materia orgánica está formada por Carbono, Hidrógeno, Oxígeno, Nitrógeno y Azufre o CHONS por sus siglas, cada sustancia tiene una cantidad específica de cada elemento lo cual de las características que permiten diferentes aplicaciones. Además, la materia orgánica contiene agua lo cual nos conduce al primer paso para determinar el BMP: el peso seco o *dry weight* (dw) es necesario para llevar a cabo el cálculo, la mayoría de autores lo enuncian para términos prácticos, sin embargo este se puede obtener por medio del peso húmedo o wear weight (ww) y el porcentaje de humedad de la biomasa que también son comúnmente entregados en diversos estudios.

En condiciones de laboratorio el peso seco se obtiene después de poner la materia orgánica en un horno

$$dw = \frac{\text{Peso materia seca}}{\text{Peso inicial}}$$

Ecuación 4

Con el peso seco se determina el porcentaje de cada elemento a través de una sencilla fórmula:

$$\%X = \frac{mX}{dw}$$

Ecuación 5

Donde:

mX: masa de elemento x.

dw: peso seco.

%X: porcentaje de elemento x presente en la biomasa seca.

⁴⁵ HIDALGO, Dolores, MARTÍN-MARROQUÍN Jesús. Biochemical methane potential of livestock and agri-food waste streams in the Castilla y Leon Region (Spain).2015. Food Res Int 2015;73:226–33. doi:10.1016/j.foodres.2014.12.044.

Esta fórmula debe ser aplicada para los CHONS después de un análisis estequiométrico en el cual podamos el total de k mol de los elementos.

Para obtener la fórmula empírica se relaciona el resultado de la ecuación 5 sobre el peso molecular de cada elemento dada la siguiente fórmula:

$$a = \frac{\%X}{PmX}$$

Ecuación 6

Donde:

Pm X: peso molecular de X.

%X: porcentaje de elemento x presente en la biomasa seca.

Después de generar el resultado para cada elemento se identifica cual es el valor más bajo, generalmente se encuentra el azufre como valor menor, seguidamente se divide al resto de valores por este, si el resultado es un número fraccionado se aproxima al siguiente número entero. Los coeficientes obtenidos corresponden al número de moléculas de cada componente, de esta manera obtenemos:



Siendo x el número de moléculas de cada elemento

En la búsqueda por estimar el potencial de producción de biometano se encuentra la ecuación de Boyles la cual nace del balance estequiométrico de los reactivos.

Si se tiene una materia cuya composición está dada por:



Si se agrega agua y esperamos como productos $CH_4 + CO_2 + NH_3 + H_2S$, Obtenemos:



Ecuación 7

$$A = \frac{4C - h - 2O - 3n + 2s}{4}$$

Ecuación 8

$$B = \frac{4C - 2O - 3n - 2S + H}{8}$$

Ecuación 9

$$C = \frac{4C - h + 2O + 3n + 2S}{8}$$

Ecuación 10

La ecuación da como resultado el número de moléculas que se espera tener de cada producto. Para determinar la cantidad producida se hace uso de la ecuación de estado: $pv = nRT$

De manera que:

$$v = n \frac{RT}{p}$$

Ecuación 11

Donde:

v: volumen.

n: número de moles

R: Constante universal de gases ($8.314 \frac{J}{molK}$)

T: temperatura.

p: presión.

Considerando condiciones atmosféricas, lo cual refuerza aún más que se trata de un valor teórico ya que en un biodigestor estas cambian.

P= 101 K Pa y T= 300°K

Reemplazando:

$$v = n \left(\frac{8.314 \frac{J}{mol \cdot K} \cdot 300 K}{101 KPa} \right)$$

$$v = (n) 24.7 \frac{\text{Litros}}{\text{mol}}$$

Para obtener el volumen para cada producto se debe reemplazar el número de moles (n) obtenido en la ecuación de Boyles, en especial se busca obtener este volumen para el metano, los resultados obtenidos son útiles pero no son muy utilizados ya que se encuentran en moles y para facilitar y dimensionar mejor los resultados se sugiere realizar la conversión a kilogramos, de esta manera se calcula el potencial de producción de metano por cada kilogramo de materia prima.

6.2. COMPOSICIÓN DE LA FRACCIÓN ORGÁNICA.

El uso de la composición de la fracción orgánica para calcular la producción (BMPth) es un buen método en el cual los componentes de fácil biodegradabilidad como carbohidratos, lípidos y proteínas y los componentes de pobre biodegradabilidad como fibras son tomados en cuenta. La fórmula de Buswell indica la cantidad de metano proveniente de los diferentes compuestos, se puede expresar como:

$$BMP_{th} = 415 \times \% \text{carbohidratos} + 496 \times \% \text{proteínas} + 1014 \times \% \text{lípidos}^{46}$$

Ecuación 12

Aunque este método puede predecir el rendimiento final de metano, la composición química se obtiene utilizando métodos químicos, lo que lleva a una gran cantidad de tiempo requerida para la obtención de esta composición.

6.3. DEMANDA QUÍMICA DE OXÍGENO.

El BMP se puede calcular a partir de la cantidad de material y la concentración de DQO (demanda química de oxígeno) de la prueba mediante la Ecuación 2,

⁴⁶ NIELFA, Ana, et al. Theoretical methane production generated by the co-digestion of organic fraction municipal solid waste and biological sludge. *Biotechnol Rep (Amst)*. 2014;5:14-21. Published 2014 Oct 24. doi:10.1016/j.btre.2014.10.005

suponiendo que esta ecuación es válida para cualquier sustancia o producto. Esta ecuación da el valor teórico del metano en condiciones de laboratorio:

$$BMP_{th} = \frac{n_{CH_4} RT}{p VS_{agregado}}$$

Ecuación 13

Donde BMP_{th} es la producción teórica en condiciones teóricas normales o constante, R es la constante de gas ($R = 0.082 \text{ atm L / mol K}$), T es la temperatura de la botella de vidrio (308 K), p es la presión atmosférica (1 atm), VS agregado (g) son los sólidos volátiles del sustrato y n_{CH_4} es la cantidad de metano molecular (mol) determinada por la ecuación:

$$n_{CH_4} = \frac{DQO}{64 \left(\frac{g}{mol} \right)}$$

Ecuación 14

7. CARACTERIZACIÓN DE LA BIOMASA.

Es importante aclarar las características productivas de cada biomasa empleada en el proceso, los factores de potencial uso de sus subproductos y las características bioquímicas de cada una de estas biomásas, para un posterior análisis de generación térmica y eléctrica.

Las biomásas de estudio anteriormente fueron seleccionadas debido a la disponibilidad, producción anual, adicionalmente si realizó una diferenciación entre biomasa de origen animal y vegetal ya que se evaluó contenido de amoníaco y de fibra respectivamente.

7.1. CAFÉ.

En el proceso del café se estima que menos del 5% de la biomasa generada se aprovecha en la elaboración de la bebida⁴⁷. La mayor parte del fruto recolectado es desechada poco a poco en los diferentes procesos hasta la obtención de la bebida como se presenta en la siguiente tabla:

Proceso	Residuos obtenidos	Pérdida [g]
Despulpado	Pulpa fresca	436
Desmucilaginado	Mucílago	149
Secado	Agua	171
Trilla	Pergamino	42
	Película plateada	
Torrefacción	Volátiles	22
Preparación bebida	Borra	104
Pérdida acumulada		924

Tabla 5. Residuos del proceso de beneficio de café (1.000 g de café cereza).⁴⁸

⁴⁷ RODRIGUEZ, Nelson, ZAMBRANO, Diego . Los subproductos del café: Fuente de energía renovable. Manizales. 2010: Cenicafé. doi:ISSN-0120-0178.

⁴⁸ Ibid., p.3

Los subproductos obtenidos posteriormente al proceso de secado presentan una humedad baja y un contenido de fibras elevado que pueden ser aprovechadas de mejor manera en procesos termoquímicos y es por esto que no se consideran en procesos anaeróbicos, la pulpa y el mucílago que son los subproductos con mayor porcentaje de peso del café cereza (58.5%) presentan un gran potencial de aplicación⁴⁹, el problema con el mucílago es que no existe un único método para su obtención, siendo aún muy practicada en el país la fermentación de esta en estanques, debido a esto solo se tomará la pulpa de café para su análisis.

La pulpa de café reporta valores del orden de 2.13 toneladas de residuo por cada tonelada de producto comercial (Ver anexo B), considerando la producción promedio nacional 749,319.64 [ton/año]⁵⁰ para calcular la producción de desechos:

$$\text{Factor de desperdicio} \times \text{Producción nacional} = \text{Desperdicio anual}$$

Ecuación 15

Reemplazando:

$$2.13 \frac{\text{ton}_{\text{residuo}}}{\text{ton}_{\text{producto principal}}} \times 749,319.64 \frac{\text{ton}_{\text{producto principal}}}{\text{año}} = 1.596 \times 10^6 \frac{\text{ton}_{\text{residuo}}}{\text{año}}$$

Estudios realizados por Cenicafé han arrojado una composición química para cafetos colombianos del departamento de Caldas como la que se presenta en la siguiente tabla:

⁴⁹ RODRIGUEZ, Nelson, ZAMBRANO, Diego . Los subproductos del café: Fuente de energía renovable. Manizales. 2010: Cenicafé. doi:ISSN-0120-0178.

⁵⁰ MinAgricultura. Estadísticas agropecuarias: Agronet disponible en internet: <http://www.agronet.gov.co/estadistica/Paginas/default.aspx>.

Pulpa de café		
Determinación	Fresca	Dos meses
Humedad (%)	74.83	79.6
pH	4.4	8.25
Cenizas (%)	6.66	14.68
Grasas (%)	1.6	1.49
Proteína (%)	11	19.91
Fibra (%)	11.43	29.47
CHO solubles (%)	69.31	34.47
MO (%)	93.34	85.33
C/N	30.72	15.55
N (%)	1.76	3.19
P (%)	0.13	0.23
K (%)	2.82	6.55
Ca (%)	0.32	0.75
Mg (%)	0.08	0.8
Fe (ppm)	158.75	1575
Mn (ppm)	69	95.5
Zn (ppm)	8,25	76
Cu (ppm)	9.75	15
B (ppm)	21.75	45

Tabla 6. Composición química de la pulpa de café.⁵¹

Para estimar el valor de generación de metano residuo se empleó la ecuación de Buswell y basándonos en los porcentajes entregados por Cenicafé en la tabla 6 obtenemos el potencial de generación en ml de CH₄ relacionado con los gramos de sólidos totales, es decir con el peso de la materia seca.

$$BMP_{th} = 415 \times (0.6931) + 496 \times (0.11) + 1014 \times (0.016) = 358,4205 \frac{mL CH_4}{g ST}$$

Calcular el peso de la materia seca en una zona rural colombiana es extremadamente difícil por lo cual para facilitar la comprensión y dimensionamiento de un biodigestor se retoma el cálculo adicionando el porcentaje de humedad de la materia prima.

$$BMP_{th} = 358,4205 \frac{mL CH_4}{g ST} \times (1-0.7483) \frac{g ST}{g Residuo} = 90,21444 \frac{mL CH_4}{g residuo}$$

Por último, para estimar el potencial de producción nacional, haremos uso de la siguiente ecuación:

$$BMP_{th} \times Desperdicio\ anual = Producción\ anual\ de\ metano$$

Ecuación 16

Reemplazando:

$$90,21444 \frac{mL CH_4}{g residuo} \times \frac{1\ m^3\ CH_4}{1.000.000\ mL\ CH_4} \times \frac{1.000.000\ g\ residuo}{1\ ton\ residuo} \left(1,596,050.83 \frac{ton_{residuo}}{año} \right) = 143,986 \times 10^6 \frac{m^3\ CH_4}{año}$$

7.2. PALMA DE ACEITE.

El aceite de palma es el producto final obtenido del procesamiento de la fruta de la palma de aceite, el aceite corresponde aproximadamente al 21% del peso del fruto,

⁵¹ BLANDON Gladys., DAVILA, Maria., Rodríguez, Nelson. Caracterización microbiológica y físico-química de la pulpa de café sola y con mucílago. Manizales: Cenicafé 1999;50:5–23. doi:10.1111/j.1743-7563.2010.01370.x.

para lograr este resultado el fruto tuvo que pasar por una gran variedad de procesos generando una larga cadena de subproductos, el siguiente esquema resume los subproductos generados por esta actividad.

La palma de aceite reporta valores del orden de 0,217 [ton residuo/ton producto principal] para el cuesco, 0,627 [ton residuo/ton producto principal] para la fibra y de 1,06 [ton residuo/ton producto principal] para el raquis de palma (Ver anexo B), considerando la producción promedio nacional 2.217.686,19 [ton/año], se puede estimar un valor de generación por medio de la ecuación 15:

Cuesco:

$$0.217 \frac{\text{ton}_{\text{residuo}}}{\text{ton}_{\text{producto principal}}} \times 2,217,686.19 \frac{\text{ton}_{\text{producto principal}}}{\text{año}} = 481.237 \times 10^3 \frac{\text{ton}_{\text{residuo}}}{\text{año}}$$

Fibra:

$$0.627 \frac{\text{ton}_{\text{residuo}}}{\text{ton}_{\text{producto principal}}} \times 2,217,686.19 \frac{\text{ton}_{\text{producto principal}}}{\text{año}} = 1.390 \times 10^6 \frac{\text{ton}_{\text{residuo}}}{\text{año}}$$

Raquis:

$$1.06 \frac{\text{ton}_{\text{residuo}}}{\text{ton}_{\text{producto principal}}} \times 2,217,686.19 \frac{\text{ton}_{\text{producto principal}}}{\text{año}} = 2.350 \times 10^6 \frac{\text{ton}_{\text{residuo}}}{\text{año}}$$

La composición de los diferentes subproductos (desperdicios) de la actividad de procesamiento de palma, han sido símbolo de estudio por diferentes autores, la siguiente tabla es producto de un estudio realizado por el Msc. Luis Alberto Quintero de la Universidad de Manizales en donde compara composiciones de palmas de aceite colombianos con las composiciones reportadas por diferentes autores:

Parámetro	El autor			García et al. 2016			Abdullah et al. 2011	Vassilev Et al. 2010	
	Raquis	Fibra	Cuesco	Raquis	Fibra	Cuesco	Raquis	Fibra	Cuesco
Carbono (%C)	46.47	49.62	50.79	47	44	50	48.9	51	51.5
Hidrógeno (%H)	6.22	6.18	5.91	-	-	-	6.3	6.6	6.6
Oxígeno (%O)	42.25	37.07	36.62	-	-	-	36.7	39.5	40.1
Nitrógeno (%N)	1.12	1.68	0.8	0.6	1.9	0.4	0.7	1.5	1.5
Azufre (%S)	0.077	0.116	0.055	0.4	0.2	0.2	0.2	0.3	0.3

Tabla 7. Comparación de la composición elemental de los residuos de palma de aceite.⁵²

Parámetro	El autor			Incombustion, 2016		
	Raquis	Fibra	Cuesco	Raquis	Fibra	Cuesco
Humedad (%)	7.21	7.84	6.26	19.48	19.48	23.02
Cenizas (%)	7.58	9.36	2.47	7.2	18.07	7.79
Materia volátil (%)	69.14	66.51	70.80	76.28	70.48	79.24
Carbono fijo (%)	16.07	16.29	20.47	16.52	11.05	12.97

Tabla 8. Comparación de la composición proximal de los residuos de palma.⁵³

⁵² QUINTERO, Luis. Evaluación de potencial energético de los residuos sólidos agroindustriales del proceso de extracción de aceite de palma africana como alternativa energética para el reemplazo de la leña en la zona norte del departamento del Cesar. Universidad de Manizales, 2017.

⁵³ QUINTERO, Luis. Evaluación de potencial energético de los residuos sólidos agroindustriales del proceso de extracción de aceite de palma africana como alternativa energética para el reemplazo de la leña en la zona norte del departamento del Cesar. Universidad de Manizales, 2017.

Parámetro	El autor			García, et al., 2016		
	Raquis	Fibra	Cuesco	Raquis	Fibra	Cuesco
Lignina (%)	22.49	36.81	49.6	15	24	48
Celulosa (%)	42.34	27.99	9.6	43	30	26
Hemicelulosa (%)	15.3	7.48	4.51	21	21	19

Tabla 9. Comparación de la composición proximal de las fibras de los residuos de palma de aceite⁵⁴.

Al igual que la película plateada del café (cascarilla) el cuesco resulta ser un material con un gran contenido de lignina y una baja humedad, que puede ser mejor aprovechada en procesos termoquímicos, por esta razón se descarta su aplicación en este trabajo.

Para efectos prácticos se realizó una hoja de cálculo en el software Microsoft Excel (Ver anexo C) que facilita los cálculos de las fórmulas empíricas necesarios para el desarrollo de los modelos de BMP_{th}, por medio de esta herramienta se pudo hallar la fórmula empírica de los subproductos y posteriormente su producción de biogás como se puede apreciar en las siguientes tablas:

COMPOSICIÓN		FORMULA EMPÍRICA	CARACTERÍSTICAS TERMODINÁMICAS (LABORATORIO)					
ST (% dw)	92,79		Presión (Kpa)	101,325	R (J/mol K)	8,31441		
SV (%ST)	69,14	C1548 H2468 O1056 N32 S1	Temp. (°C)	0	Producción	22,414		
C (% dw)	46,47		PRODUCTOS					
H (% dw)	6,22		921	Producción Teórica L Biogas / Kg SV	591,173	Producción Teórica L Biogas / Kg Raquis		
O (% dw)	42,25		469,918	51,0%	Producción Teórica L CH4 / Kg SV	301,476	51,0%	Producción Teórica L CH4 / Kg Raquis
N (% dw)	1,12		432,324	46,9%	Producción Teórica L CO2 / Kg SV	277,358	46,9%	Producción Teórica L CO2 / Kg Raquis
S (% dw)	0,077		18,651	2,0%	Producción Teórica L NH3 / Kg SV	11,966	2,0%	Producción Teórica L NH3 / Kg Raquis
			0,583	0,1%	Producción Teórica L H2S / Kg SV	0,374	0,1%	Producción Teórica L H2S / Kg Raquis

Tabla 10. Plantilla de cálculo de BMP para el raquis de palma de aceite.

⁵⁴ Ibid., P.20.

COMPOSICIÓN		FORMULA EMPÍRICA	Fibra					
			CARACTERÍSTICAS TERMODINÁMICAS (LABORATORIO)					
			Presión (Kpa)	101,325	R (J/mol K)	8,31441		
ST (% dw)	92,16	C1147 H1703 O643 N33 S1	Temp. (°C)	0	Producción	22,414		
SV (%ST)	66,51		PRODUCTOS					
C (% dw)	49,62		1007	Producción Teórica L Biogas / Kg SV		617,525	Producción Teórica L Biogas / Kg Fibra	
H (% dw)	6,18		522,920	51,9%	Producción Teórica L CH4 / Kg SV	320,527	51,9%	Producción Teórica L CH4 / Kg Fibra
O (% dw)	37,07		455,529	45,2%	Producción Teórica L CO2 / Kg SV	279,220	45,2%	Producción Teórica L CO2 / Kg Fibra
N (% dw)	1,68		28,151	2,8%	Producción Teórica L NH3 / Kg SV	17,255	2,8%	Producción Teórica L NH3 / Kg Fibra
S (% dw)	0,116		0,853	0,1%	Producción Teórica L H2S / Kg SV	0,523	0,1%	Producción Teórica L H2S / Kg Fibra

Tabla 11. Plantilla de cálculo de BMP para la fibra de palma de aceite.

Determinación de las producciones nacionales anuales de metano para los subproductos del beneficio de palma de aceite por medio de la ecuación 16:

Raquis:

$$301,476 \frac{L CH_4}{Kg \text{ residuo}} \times \frac{1 m^3 CH_4}{1000 L CH_4} \times \frac{1000 Kg \text{ residuo}}{1 ton \text{ residuo}} \left(2,350,747.361 \frac{ton \text{ residuo}}{año} \right) = 708.693 \times 10^6 \frac{m^3 CH_4}{año}$$

Fibra:

$$320,527 \frac{L CH_4}{Kg \text{ residuo}} \times \frac{1 m^3 CH_4}{1000 L CH_4} \times \frac{1000 Kg \text{ residuo}}{1 ton \text{ residuo}} \left(1,390,489.241 \frac{ton \text{ residuo}}{año} \right) = 445.689 \times 10^6 \frac{m^3 CH_4}{año}$$

Sumando un total de $1.154 \times 10^9 \frac{m^3 CH_4}{año}$ para los desperdicios de la palma de aceite.

7.3. BOVINOS.

Para el cálculo de la tasa de producción de estiércol se usó el censo nacional reportado por el ICA (Ver anexo D) y el atlas de potencial energético de Colombia. (Ver anexo E)

Sub-sector	Población [cabezas]	Tasa de producción de estiércol [kg/cabeza*año]	Producción anual de estiércol [ton/año]
Bovino			
Ternero <12 meses	4'293,960	1.460	6'269,181.6
Entre 12 y 24 meses	5'492,670	3.285	18'043,421.0
Entre 24 y 36 meses	5'356,696	5.110	27'372,716.6
<36 meses	8'331,696	6.570	54'739,242.7
Total	23'475,022		106'424,561.1

Tabla 12. Producción anual de estiércol bovino.

Parámetro	ST (%)	SV (%ST)	C (%)	H (%)	O (%)	N (%)	S (%)
Excreta bovina	26.74	80.85	40.73	5.17	31.47	2.87	0.61

Tabla 13. Composición elemental de la excreta bovina.⁵⁵

<i>Excretas Bovina</i>								
COMPOSICIÓN		FORMULA EMPÍRICA	CARACTERÍSTICAS TERMODINÁMICAS (LABORATORIO)					
			Presión (Kpa)	101,325	R (J/mol K)	8,31441		
ST (% dw)	26,74	C178 H269 O103 N11 S1	Temp. (°C)	0	Producción	22,414		
SV (%ST)	80,85		PRODUCTOS					
C (% dw)	40,73		1004	Producción Teórica L Biogas / Kg SV	594,468	Producción Teórica L Biogas / Kg Excretas		
H (% dw)	5,17		488,619	48,7%	Producción Teórica L CH4 / Kg SV	289,412	48,7%	Producción Teórica L CH4 / Kg Excretas Bovina
O (% dw)	31,47		451,642	45,0%	Producción Teórica L CO2 / Kg SV	267,511	45,0%	Producción Teórica L CO2 / Kg Excretas Bovina
N (% dw)	2,87		58,106	5,8%	Producción Teórica L NH3 / Kg SV	34,417	5,8%	Producción Teórica L NH3 / Kg Excretas Bovina
S (% dw)	1		5,282	0,5%	Producción Teórica L H2S / Kg SV	3,129	0,5%	Producción Teórica L H2S / Kg Excretas Bovina

Tabla 14. Plantilla de cálculo de BMP para la excreta bovina.

⁵⁵ HIDALGO, Dolores, MARTÍN-MARROQUÍN Jesús. Biochemical methane potential of livestock and agri-food waste streams in the Castilla y Leon Region (Spain).2015. Food Res Int 2015;73:226–33. doi:10.1016/j.foodres.2014.12.044.

Determinación del potencial nacional de generación de metano por medio de las excretas bovinas:

$$BMP_{th} \times \text{Producción de estiércol} = \text{Producción anual de metano}$$

Ecuación 17

Reemplazando:

$$289,412 \frac{L CH_4}{Kg excreta} \times \frac{1 m^3 CH_4}{1000 L CH_4} \times \frac{1000 Kg excreta}{1 ton excreta} \left(106,424,561.8 \frac{ton excreta}{año} \right) = 30.8 \times 10^9 \frac{m^3 CH_4}{año}$$

7.4. PORCINOS.

Al igual que en el caso de los bovinos se hizo uso del censo nacional reportado por el ICA y el atlas de potencial energético de Colombia para la elaboración de la siguiente tabla:

Sub-sector	Población [cabezas]	Tasa de producción de estiércol [kg/cabeza*año]	Producción anual de estiércol [ton/año]
Porcino			
Lechón lactante	1'183,652	102.2	120,696.2
Precebos	908,006	445.3	404,335.1
Levante	2'853,295	799.4	2'280,781.4
Reproductor	57,338	2,051.3	117,617.4
Hembra lactante	72,038	2,693.,7	194,048.8
Hembra gestante	257,164	1,971	506,870.2
Total	5'331,493		3'624,622.1

Tabla 15. Producción anual de estiércol porcino.

Parámetro	SV (%)	C (%)	H (%)	O (%)	N (%)	S (%)
Excreta porcina	22	34.8	4.7	30.3	2.2	-

Tabla 16. Composición elemental de la excreta porcina.⁵⁶

⁵⁶ ESCALANTE Humberto, et. al. Atlas del potencial energético de la biomasa residual en Colombia. 1 ed. Bucaramanga. Universidad Industrial de Santander. 2011. 180p. ISBN: 9789588504599

Al igual que con el estiércol bovino se hace uso de la hoja de cálculo para estimar la generación de metano, como se aprecia en la siguiente tabla:

		Excretas Porcina						
COMPOSICIÓN		FORMULA EMPÍRICA	CARACTERÍSTICAS TERMODINÁMICAS (LABORATORIO)					
			Presión (Kpa)	101,325	R(J/mol K)	8,31441		
ST (% dw)	-	C19 H30 O12 N1	Temp. (°C)		0	Producción		22,414
SV (%dw)	22		PRODUCTOS					
C (% dw)	34,8		965	Producción Teórica L Biogas / Kg SV		212,342	Producción Teórica L Biogas / Kg Excretas Porcina	
H (% dw)	4,7		476,562	49,4%	Producción Teórica L CH4 / Kg SV	104,844	49,4%	Producción Teórica L CH4 / Kg Excretas Porcina
O (% dw)	30,3		440,368	45,6%	Producción Teórica L CO2 / Kg SV	96,881	45,6%	Producción Teórica L CO2 / Kg Excretas Porcina
N (% dw)	2,2		48,259	5,0%	Producción Teórica L NH3 / Kg SV	10,617	5,0%	Producción Teórica L NH3 / Kg Excretas Porcina
S (% dw)	0		0,000	0,0%	Producción Teórica L H2S / Kg SV	0,000	0,0%	Producción Teórica L H2S / Kg Excretas Porcina

Tabla 17. Plantilla de cálculo de BMP para la excreta porcina.

Determinación del potencial nacional de generación de metano por medio de la ecuación 16:

$$104,844 \frac{L CH_4}{Kg excreta} \times \frac{1 m^3 CH_4}{1000 L CH_4} \times \frac{1000 Kg excreta}{1 ton excreta} \left(3,624,622.1 \frac{ton excreta}{año} \right)$$

$$= 380.019 \times 10^3 \frac{m^3 CH_4}{año}$$

8. POTENCIAL ENERGÉTICO.

Como ha sido mencionado anteriormente, el biogás es la suma de una gran cantidad de gases en diferentes proporciones, en donde destaca el metano y dióxido de carbono (CH_4 y CO_2), dependiendo de su aplicación las trazas de pequeños gases deben de ser removidas del biogás

Se hace necesario la purificación del biogás para aumentar el poder calorífico de este y a la vez para cumplir con los parámetros requeridos en la utilización de esta energía en vehículos, para la purificación del biogás se busca eliminar en su mayoría el CO_2 , vapor de agua y gases no necesarios para el proceso energético, a través de calentadores, motores de combustión interna o sistemas generadores se procesa el biogás para eliminar todo tipo de gas innecesario.

En cuanto al tema de la estimación del potencial energético de las biomásas en estudio, se necesita cuantificar la cantidad de gas disponible por la totalidad de ellas, la cual se calcula sumando las producciones individuales de las biomásas:

$$\begin{aligned} &143'986,831.83 \frac{\text{m}^3 \text{CH}_4}{\text{año}} + 1'154,383,256.35485 \frac{\text{m}^3 \text{CH}_4}{\text{año}} + \\ &30'800,545,279.662 \frac{\text{m}^3 \text{CH}_4}{\text{año}} + 380'019,879.452 \frac{\text{m}^3 \text{CH}_4}{\text{año}} = \\ &32.478 \times 10^9 \frac{\text{m}^3 \text{CH}_4}{\text{año}} \end{aligned}$$

Considerando un poder calorífico inferior (PCI) de $10 \text{ kWh/m}^3 \text{ CH}_4$ y una eficiencia promedio del 30% para la tecnología de aprovechamiento, se puede calcular la capacidad de generación por medio de la ecuación:

$$\textit{Producción anual de metano} \times \textit{PCI} \times \textit{Eficiencia} = \textit{Potencia eléctrica}$$

Ecuación 18

Café:

$$143'986,831.83 \frac{m^3 CH_4}{año} \times 10 \frac{kWh}{m^3 CH_4} \times 0.3 = 431'960,495.51 \frac{kWh}{año} = 49.31056 \text{ MW}$$

Palma de aceite:

$$1'154,383,256.35 \frac{m^3 CH_4}{año} \times 10 \frac{kWh}{m^3 CH_4} \times 0.3 = 3'463,149,769.06455 \frac{kWh}{año} = 395,33673 \text{ MW}$$

Bovino:

$$30'800,545,279.662 \frac{m^3 CH_4}{año} \times 10 \frac{kWh}{m^3 CH_4} \times 0.3 = 92'401,635,838.986 \frac{kWh}{año} = 10,548.1319 \text{ MW}$$

Porcino:

$$380'019,879.452 \frac{m^3 CH_4}{año} \times 10 \frac{kWh}{m^3 CH_4} \times 0.3 = 1'140,059,638.356 \frac{kWh}{año} = 130.14379 \text{ MW}$$

Total:

$$49.31056 \text{ MW} + 395.33673 \text{ MW} + 10,548.1319 \text{ MW} + 130.14379 \text{ MW} = \mathbf{11.12292 \text{ GW}}$$

El siguiente gráfico resume los potenciales individuales de generación de cada una de las biomásas ya sea en (W/cabeza) para el caso de las biomásas pecuarias o (W/hectárea) en el caso de las biomásas agrícolas y las barras presentes en el gráfico indican la potencia total de cada una de las biomásas:

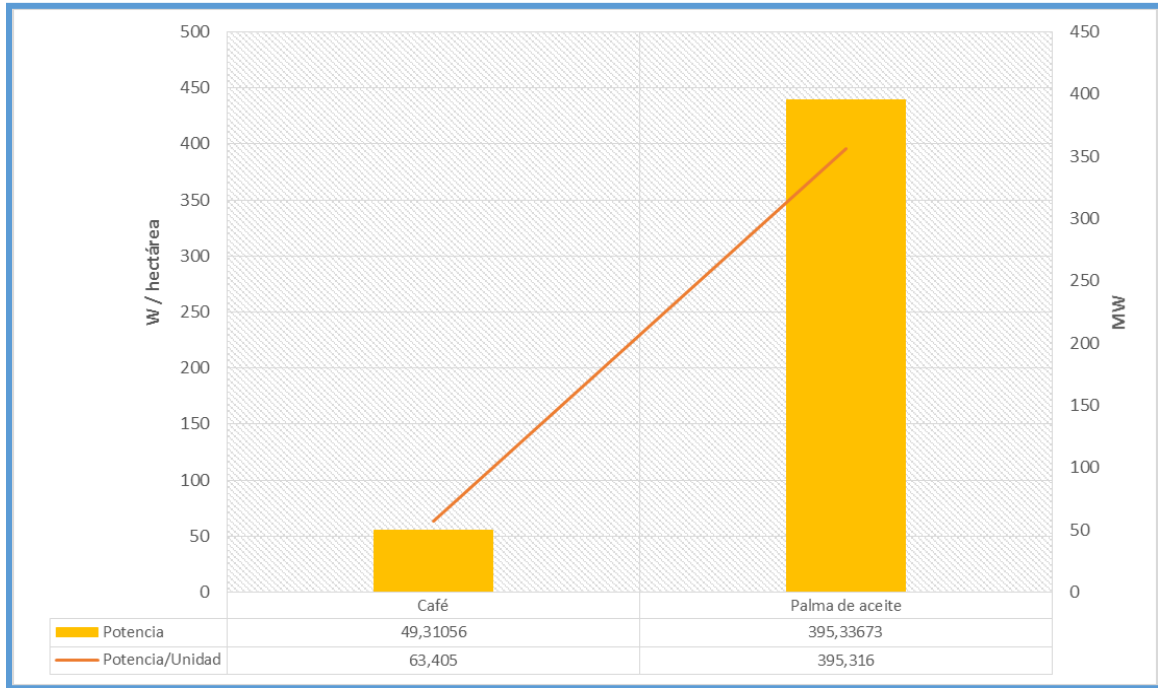


Grafico 9. Potencial energético de las biomásas agrícolas en Colombia.

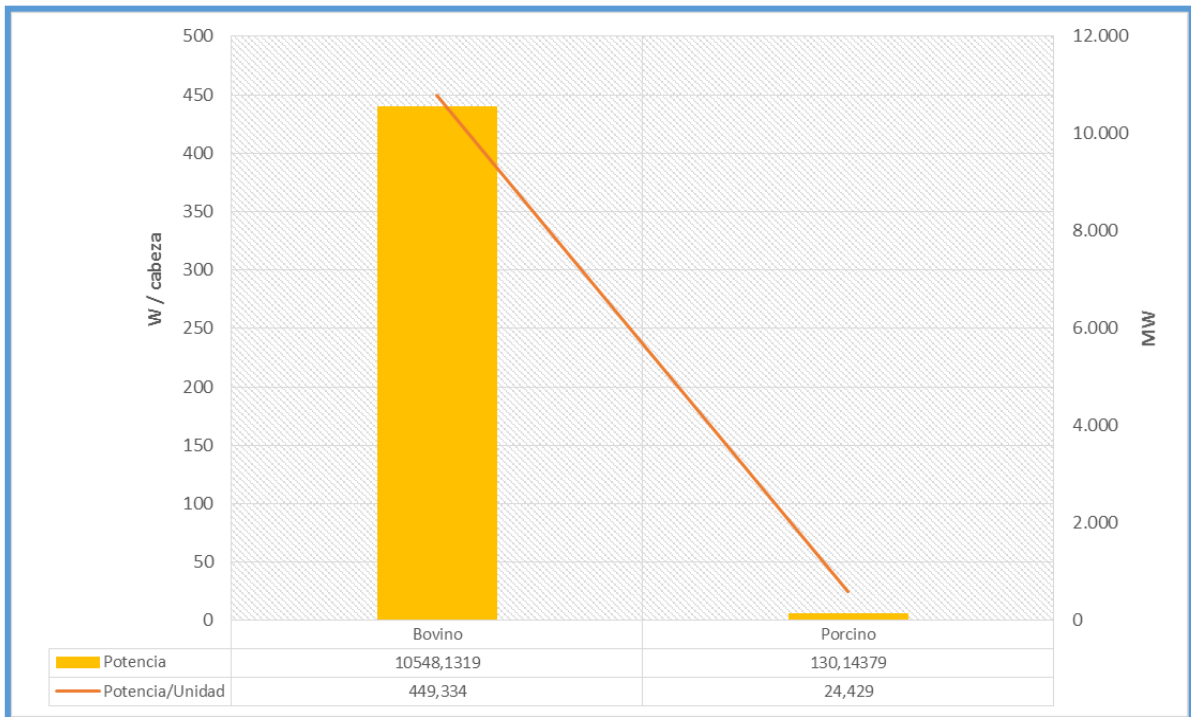


Grafico 10. Potencial energético de las biomásas pecuarias en Colombia.

9. CONCLUSIONES.

Es posible observar el potencial energético ofrecido por la biomasa pecuaria como lo es el estiércol bovino gracias al gran número de especímenes en el país los cuales hasta el 2017 suman 23, 475,022 cabezas, estimando una producción de 30, 800,545,279.662 toneladas de biomasa al año los cuales generan un aproximado de 10.548 GW, adicionalmente el potencial energético de las biomásas agrícolas se destaca la palma de aceite debido a su eficiencia y el gran número de desperdicios generados que presenta este cultivo: cuantificando un promedio de 3, 741,236.602 toneladas de desechos anuales con la posibilidad de generar un total de 395.337 MW, que al sumar las producciones de cada biomasa se obtienen 11.12 GW que corresponden al 16.68% de la demanda nacional total de 66.67 GW. Según la tabla 4 la generación de energía mediante biomasa para año 2017 fue 632.8 GWh sin embargo esta cantidad pudo ser alcanzada mediante procesos de pirólisis de la biomasa directamente y no corresponde necesariamente a la generación de biogás.

La producción de biogás es muy sensible a una gran cantidad de variables dada a la gran variación en las distintas biomásas y del origen de estas, cabe resaltar que existen gran cantidad de inhibidores y catalizadores que se deben tener en cuenta para la producción del biogás. Por último y no menos importante se destacan 3 tipos de sistemas generales utilizados en la producción de biogás las cuales son: pasivos, de baja velocidad y alta velocidad, cada una con una finalidad diferente según la escala y los resultados esperados.

Colombia es un país ubicado entre el trópico de Cáncer y el Ecuador, por lo cual es afectada fuertemente por los fenómenos del niño y la niña los cuales interfieren drásticamente en la adquisición de energía proveniente de hidroeléctricas, igualmente el país busca expandir su producción energética para exportar a países vecinos como Panamá y Chile.

Los costos comerciales de la generación de energía eléctrica en Colombia, se asumen como una restricción para la generación de estas tecnologías a pequeña escala, ya que incluyen lo relacionado con la transmisión, distribución y comercialización, y encarecen el precio que se le puede reconocer al pequeño generador (hasta un 40 % del valor comercial). Según el portal de XM que es la bolsa en la cual se oferta la energía eléctrica producida en Colombia, el precio del Kw ronda \$ 172.25 COP. Por medio un simple cálculo podemos determinar que \$

1'915, 922,970 COP se dejan de percibir en la economía del país, correspondiente a 11.12292GW provenientes de biomasa desechada.

Se puede concluir que la composición química de las biomases denota en una gran diferencia en la generación de metano, para dar un estimado de estas diferencias se elaboró la siguiente figura, el cual compara las producciones de biogás con la misma cantidad de entrada de los residuos:

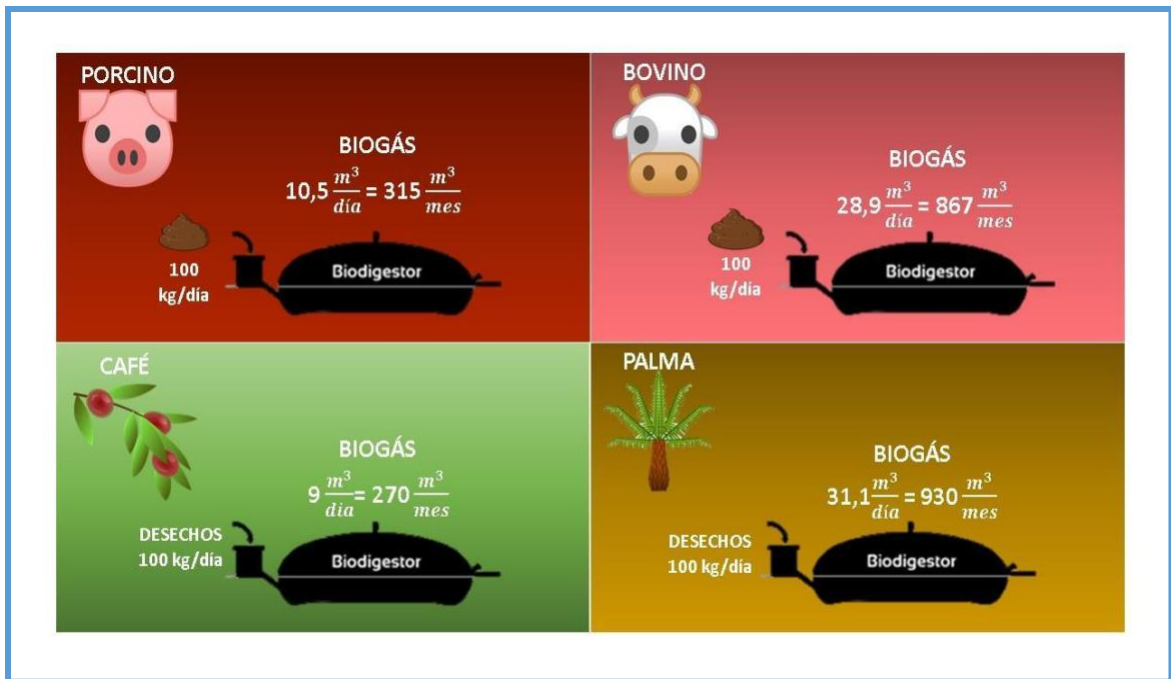


Figura 1. Producción de biogás por 100 kg de biomasa.

BIBLIOGRAFÍA.

BLANDON Gladys., DAVILA, Maria., Rodríguez, Nelson. Caracterización microbiológica y físico-química de la pulpa de café sola y con mucílago. Manizales: Cenicafé 1999;50:5–23. doi:10.1111/j.1743-7563.2010.01370.x.

Colombia.com. Economía. Colombia. Com.2018. Disponible en internet: <https://www.colombia.com/colombia-info/informacion-general/economia/>.

El Espectador [en línea]: Bogotá D.C. 13, Julio, 2018. 1 secc. 1 p. Disponible en internet: <https://www.elespectador.com/noticias/medio-ambiente/colombia-ratifica-el-acuerdo-de-paris-sobre-el-clima/>.

ESCALANTE Humberto, et. al. Atlas del potencial energético de la biomasa residual en Colombia. 1 ed. Bucaramanga. Universidad Industrial de Santander. 2011. 180p. ISBN: 9789588504599

EASTMAN, John y FERGUSON, John. Solubilization of particulate organic carbon during the acid phase anaerobic digestion. J Wat Pollut Control Fed 53 (1981), p. 352–366

GARCÍA, Rolando. Interdisciplinarietà y sistemas complejos. Revista Latino americana de Metodología de las Ciencias Sociales. 2011, Primer semestre, Vol 1. p 66-101.

Grupo de Investigación en Procesos Químicos y Centro de Desarrollo Industrial TECSOL. Estimación del Potencial de Conversión a Biogás de la Biomasa en Colombia y su Aprovechamiento. Informe final. Bogotá D.C: Universidad Nacional de Colombia. Bioquímicos de la Facultad de Ingeniería. 2018. 216p.

HIDALGO, Dolores, MARTÍN-MARROQUÍN Jesús. Biochemical methane potential of livestock and agri-food waste streams in the Castilla y Leon Region (Spain).2015. Food Res Int 2015;73:226–33. doi:10.1016/j.foodres.2014.12.044.

ICA. Censo Pecuario Nacional - 2017. 2018.

IDEAM, PNUD, MADS, DNP, Cancillería. Inventario Nacional de Gases de Efecto Invernadero (GEI) de Colombia. Bogotá, Colombia: 2015.

MinAgricultura. El sector agropecuario mantiene un crecimiento positivo con una variación de 2% en el primer trimestre de 2018. Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural Disponible en internet: <https://www.minagricultura.gov.co/noticias/Paginas/El-sector-agropecuario-mantiene-un-crecimiento-positivo-con-una-variación-de-2-en-el-primer-trimestre-de-2018.aspx>.

MinAgricultura. Estadísticas agropecuarias: Agronet disponible en internet: <http://www.agronet.gov.co/estadistica/Paginas/default.aspx>.

MINENERGIA, PNUD, FAO, GEF. Manual de Biogás. Santiago de Chile. 2011. No 1. p 115

MINENERGIA,UPME, BALANCE ENERGÉTICO COLOMBIANO - BECO.[<https://www1.upme.gov.co/>] Bogota. [Consultado:2 de Septiembre de 2020].Disponible en:<https://www1.upme.gov.co/InformacionCifras/Paginas/BalanceEnergetico.aspx>

NIELFA, Ana, et al. Theoretical methane production generated by the co-digestion of organic fraction municipal solid waste and biological sludge. Biotechnol Rep (Amst). 2014;5:14-21. Published 2014 Oct 24. doi:10.1016/j.btre.2014.10.005

OWEN, William, et. al. Bioassay for monitoring biochemical methane potential and anaerobic toxicity. Water Research. 1979. Vol. 13(6), p .485-492. doi:10.1016/0043-1354(79)90043-5.

PARRA, Brayan, et al. Influencia del pH sobre la digestión anaerobia de biorresiduos de origen municipal. Rev UDCA Actual Divulg Científica 2014; 17:553–62.

Portafolio, Demanda de energía en 2019, la más alta del país desde 2015. En: Periodico Portafolio. Bogotá, Enero 20 de 2020. [Consultado: 2 de septiembre de 2020]. Disponible en:<https://www.portafolio.co/economia/demanda-de-energia-en-2019-la-mas-alta-del-pais-desde-2015-537280>

QUINTERO, Luis. Evaluación de potencial energético de los residuos sólidos

agroindustriales del proceso de extracción de aceite de palma africana como alternativa energética para el reemplazo de la leña en la zona norte del departamento del Cesar. Universidad de Manizales, 2017

RODRIGUEZ, Nelson, ZAMBRANO Diego . Los subproductos del café: Fuente de energía renovable. Manizales. 2010: Cenicafé. doi:ISSN-0120-0178.

RODRIGUEZ, Rafaela, et.al. Comparative analysis of methods and models for predicting biochemical methane potential of various organic substrates. ScienceDirect [online]. 14, febrero, 2019. Sci Total Environ 2019;649:1599–608. doi:10.1016/j.scitotenv.2018.08.270.

SÁENZ, Orlando. Las ciencias ambientales como nueva área del conocimiento. Bogotá: Digiprint, 2007. p. 33

SIEVERS, Dennis y IANOTT, Eugenel. Buffer stability in manure digesters. En: Agric. Wastes 4 (1982), Georgacakis, Dimitris; Sievers p. 427–441)

TELLO, Pab. Estudio de los efectos del pH extremo por adición de NaOH sobre la producción y calidad del biogás y otros parámetros de la digestión anaerobia urbana. Instituto Universitario del Agua y de las Ciencias Ambientales. Alicante. 2013.

Unidad de Planeación Minero-Energética. Potencialidades de los cultivos energéticos y residuos agrícolas en Colombia. Bogotá D.C: Ministerio de Minas y Energía. 2002. 20 p

XM S.A. Informe de operación del SIN y Administración del Mercado 2017. 2017.

XM S.A. Informe de operación del SIN y Administración del Mercado 2016. 2016.