

**ASPECTOS FUNDAMENTALES DE LA UTILIZACIÓN DE BIOGÁS COMO
FUENTE ALTERNATIVA DE SUMINISTRO DE GAS EN UN CAMPO
COLOMBIANO.**

**KATHLYN GARCIA ECHENIQUE
KATHLEEN HOOKER NARANJO**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE FISICOQUÍMICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA DE PETRÓLEOS
BUCARAMANGA**

2022

**ASPECTOS FUNDAMENTALES DE LA UTILIZACIÓN DE BIOGÁS COMO
FUENTE ALTERNATIVA DE SUMINISTRO DE GAS EN UN CAMPO
COLOMBIANO.**

**KATHLYN GARCIA ECHENIQUE
KATHLEEN HOOKER NARANJO**

**Trabajo de grado para optar por el título de
INGENIERÍA DE PETRÓLEOS**

**DIRECTOR
M.Sc. ERIK GIOVANY MONTES PÁEZ**

**CODIRECTOR
CAMILO ANDRES GUERRERO MARTIN**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE FISICOQUÍMICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA DE PETRÓLEOS
BUCARAMANGA
2022**

CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN	13
1. OBJETIVOS	15
1.1 OBJETIVO GENERAL	15
1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	15
2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	16
2.1 DEFINICIÓN DEL PROBLEMA	16
2.2 JUSTIFICACIÓN	17
3. INTRODUCCIÓN A LA BIOMASA	18
3.1 FUENTES DE BIOMASA	21
3.1.1 La Biomasa Natural.	22
3.1.2 La biomasa residual	22
3.2 TIPOS DE BIOMASA	24
3.2.1 Según su porcentaje de humedad	25
3.2.2 Según su origen	26
3.2.3 Según su composición	26
3.3 PROCESOS DE TRANSFORMACIÓN DE LA BIOMASA	27
3.3.1 Métodos térmicos	28
3.3.2 Métodos bioquímicos	29
3.4 USOS Y APLICACIONES DE LA BIOMASA	29
3.4.1 Producciones de energía	31
3.4.2 Producción de biocombustibles	31
4. CONTEXTO BIOMASA EN COLOMBIA	33
4.1 DISPONIBILIDAD DE LA BIOMASA PARA SU APROVECHAMIENTO	38
4.1.1 Sector agrícola.	38
4.1.1.1 Arroz	39
4.1.1.2. Maíz	40
4.1.1.3. Banano	41

4.1.1.4 Café	42
4.1.1.5 Caña de azúcar	43
4.1.1.6 Caña de panela	44
4.1.1.7 Palma de aceite	45
4.1.1.8 Plátano	45
4.1.2 Sector pecuario	47
4.1.2.1 Avícola	49
4.1.2.2 Porcicola	50
4.1.2.3 Bovino	51
5. IDENTIFICACIÓN DE LOS ASPECTOS FUNDAMENTALES	54
5.1 SELECCIÓN DE LA BIOMASA	54
5.1.1 Correlación campos-Residuos orgánicos (agrícolas- pecuarios).	55
5.1.2 Matriz de selección.	59
5.1.2.1 Criterios de selección.	62
5.1.2.2 Evaluación y justificación de criterios.	63
5.1.2.3 Calificación de los criterios.	67
5.1.2.4 Homogenización de los criterios.	67
5.1.2.5 Porcentaje de importancia.	69
5.2 CONVERSIÓN DE LA BIOMASA A TRAVÉS DEL SISTEMA BIODIGESTOR	71
5.3 SEPARACIÓN Y CAPTURA	73
5.4 TRANSPORTE	75
6. APLICACIÓN DE LA BIOMASA RESIDUAL EN LA INDUSTRIA DEL PETRÓLEO: CASO JUGUETE	77
6.1 CONTEXTUALIZACIÓN DEL PILOTO DE INYECCIÓN DE CO ₂	78
6.2 CARACTERÍSTICAS DE LA PALMA DE ACEITE COMO BIOMASA RESIDUAL	82
6.3 GENERALIDADES DE LA PLANTA DE BENEFICIO	84
6.4 SELECCIÓN DEL SISTEMA DE BIORREACTOR A EMPLEAR	85
6.5 ESTIMACIÓN DEL BIOGÁS A PARTIR DEL POME	88

6.6 SEPARACIÓN Y CAPTACIÓN DEL CO ₂	93
6.7 ALMACENAMIENTO Y TRANSPORTE DEL CO ₂ OBTENIDO DEL BIOGÁS	100
6.8 COSTOS POR CONSIDERAR PARA CASO JUGUETE	101
6.9 RESULTADOS DEL CASO JUGUETE	102
7. CONCLUSIONES	104
8. RECOMENDACIONES	106
BIBLIOGRAFÍA	107
ANEXOS	116

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Fuentes de biomasa	24
Tabla 2. Sector agrícola. Producción de cultivos principales por departamentos	38
Tabla 3. Sector Pecuario.	48
Tabla 4. Potencial energético de los sectores priorizados.	49
Tabla 5. Tipos de residuos agrícolas	57
Tabla 6. Tipos de residuos pecuarios	57
Tabla 7. Participación porcentual en el mercado nacional	59
Tabla 8. Estructura general matriz Richman.	61
Tabla 9. Criterios de selección	62
Tabla 10. Calificación de criterios para cada tipo de biomasa	67
Tabla 11. Identificación de máximos y mínimos	68
Tabla 12. Pendientes de las curvas de funciones de transformación para cada criterio	68
Tabla 13. Valores de criterios homogenizados	69
Tabla 14. Asignación de porcentaje de importancia para cada criterio	70
Tabla 15. Valores de los criterios ponderados.	70
Tabla 16. Disponibilidad de biorreactores para transformación del POME	72
Tabla 17. Principales sistemas de captura de CO ₂	74
Tabla 18. Propiedades del yacimiento del campo estudio	80
Tabla 19. Consideraciones para el piloto de inyección de CO ₂	81
Tabla 20. Consideraciones para el piloto de inyección de CO ₂	81
Tabla 21. Propiedades físicas y químicas del POME	84
Tabla 22. Datos de producción de la planta de beneficio	88
Tabla 23. Tiempos de retención hidráulico recomendados	88
Tabla 24. Parámetros para uso del biorreactor UASB	88
Tabla 25. Etapas de la pre - combustión	97
Tabla 26. Recuperación y salida de CO ₂	99

Tabla 27. Resumen de costos asociados a la utilización del biogás en caso juguete	102
Tabla 28. Resumen técnico de la obtención de CO ₂ para su aplicación.	103

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Campos de un sistema bioenergético.	21
Figura 2. Clasificación de la biomasa	25
Figura 3. Transformaciones energéticas de la biomasa.	28
Figura 4. Esquema general del uso de la biomasa	30
Figura 5. Participación porcentual de fuentes de energía en la composición de la oferta 1975 – 2018. ⁸	33
Figura 6. Participación en la oferta interna bruta (TJ).	34
Figura 7. Participación del bagazo en la producción energética primaria 2006 – 2020.	35
Figura 8. Participación del bagazo en la producción energética primaria 2006 – 2020.	36
Figura 9. Explotación y producción nacional de recursos energéticos primarios, año 2012. Total, producción 5,290 PJ. Residuos otros: residuos de poda, centros de acopio y plazas de mercado.	37
Figura 10. Arroz - Muestra la evolución de la producción, área cosechada y rendimiento de un cultivo en un periodo de tiempo seleccionado, así como su participación porcentual con respecto al total nacional	40
Figura 11. Maíz - Evolución de producción, área cosechada y rendimiento de cultivo	41
Figura 12. Banano - Muestra la evolución de la producción, área cosechada y rendimiento de un cultivo en un periodo de tiempo seleccionado, así como su participación porcentual con respecto al total nacional	42
Figura 13. Café - Evolución de producción, área cosechada y rendimiento de cultivo.	43
Figura 14. Caña de azúcar - Evolución de producción, área cosechada y rendimiento de cultivo.	44

Figura 15. Caña de panela - Evolución de producción, área cosechada y rendimiento de cultivo.	45
Figura 16. Palma de aceite - Evolución de producción, área cosechada y rendimiento de cultivo.	46
Figura 17 Plátano - Evolución de producción, área cosechada y rendimiento de cultivo.	46
Figura 18. Producción por cultivo a nivel nacional (ton).	47
Figura 19. Producción de residuo pecuario [t/año].	49
Figura 20. Panorama nacional – Total aves – Capacidad ocupada más aves traspatio. Otros*: Cauca, Risaralda, Bolívar, Caldas, Córdoba, Huila, Nariño, Norte de Santander, Sucre, Cesar, Magdalena, Putumayo, Caquetá, Arauca, Chocó, Casanare, La Guajira, Guainia, S. Andrés/Providencia, Vaupés, Amazonas, Guaviare, Vichada.	50
Figura 21. Panorama nacional Vs RAP- Producción residuo [t/año] – Porcino.	51
Figura 22. Panorama nacional – Producción residuo [t/año] – Bovino.	52
Figura 23. Aspectos fundamentales para la obtención y uso del biogás.	54
Figura 24. Distribución de la biomasa en el departamento de Santander	56
Figura 25. Disponibilidad de residuos agrícolas	57
Figura 26. Disponibilidad de residuos pecuarios	58
Figura 27. Opciones de estudio e implementación	60
Figura 28. Flujo de principales sistemas de captura de CO ₂	75
Figura 29. Historia de producción del campo estudio	80
Figura 30. Esquema básico de un biorreactor tipo UASB.	86
Figura 31. Fases de la fermentación anaerobia. Modificada	87
Figura 32. Esquema general del proceso de captura de CO ₂ mediante técnicas de precombustión	94
Figura 33. Proceso esquemático de captura de CO ₂ .	95

LISTA DE ANEXOS

	Pág.
ANEXO 1. CORRELACIÓN CAMPOS-DEPARATAMENTOS	117

RESUMEN

TÍTULO: ASPECTOS FUNDAMENTALES DE LA UTILIZACIÓN DE BIOGÁS COMO FUENTE ALTERNATIVA DE SUMINISTRO DE GAS EN UN CAMPO COLOMBIANO.*

AUTORES: Kathlyn Garcia y Kathleen Hooker.**

PALABRAS CLAVES: Biomasa, biogás, POME, biorreactor.

RESUMEN

El documento que se desarrolla a continuación busca identificar los aspectos fundamentales a considerar para una posible aplicación de biogás como fuente de suministro de gas en la industria, puntualmente se escogió un proceso de inyección de CO₂. Este trabajo se divide en cinco capítulos que expresan de manera secuencial el proceso por el que se debe pasar para suministrar el CO₂ al campo de estudio, que se encuentra en Colombia. En el primer capítulo se contextualiza al lector acerca de la biomasa, planteándola como un sistema energético a manera de fórmula buscando una fácil retención, el segundo capítulo brinda una mirada al estado de la biomasa en Colombia, así como la variedad con la que cuenta el país; en el tercer capítulo se busca demostrar un proceso estratégico de selección de biomasa mediante de una correlación y la aplicación de una matriz multicriterio, con el fin de un máximo aprovechamiento, dando como resultado la palma de aceite como biomasa conveniente. En el cuarto segmento se identifican los aspectos a considerar para lograr la aplicación del biogás en un proceso de la industria, en la que se analiza la biomasa, su proceso de conversión, captura del gas de interés y transporte hasta la locación donde se empleará. Por último, se reflexiona acerca de aspectos definidos implementándolos en un caso puntual de la industria, en el que se toma el tiempo de obtención de los volúmenes de CO₂ requeridos como dato crucial, rectificando la posibilidad de la utilización del biogás en este tipo de procesos.

* Trabajo de grado

** Faculta de Fisicoquímicas. Director M.Sc ERIK GIOVANY MONTES PÁEZ

ABSTRACT

TITLE: FUNDAMENTAL ASPECTS OF THE USE OF BIOGAS AS AN ALTERNATIVE SOURCE OF GAS SUPPLY IN A COLOMBIAN FIELD.*

AUTHORS: Kathlyn García y Kathleen Hooker.**

KEY WORDS: Biomass, biogas, POME, bioreactor, CO2 injection.

ABSTRACT

The document that follows seeks to identify the fundamental aspects to consider for a possible application of biogas as a source of gas supply in a recovery process in the oil industry, which is the injection of CO₂. This work is divided into five chapters that sequentially express the process that must be passed through to supply CO₂ to the field of study, which is in Colombia. In the first chapter the reader is contextualized about biomass, presenting it as an energy system as a formula seeking easy retention, the second chapter provides a look at the state of biomass in Colombia, as well as the variety that the system has. country: The third chapter seeks to demonstrate a strategic biomass selection process through a correlation and the application of a multicriteria matrix, to maximize its use, resulting in oil palm as a suitable biomass. The fourth segment identifies the aspects to be considered to achieve the application of biogas in an industrial process, in which the biomass, its conversion process, capture of the gas of interest and transport to the location where it will be used are analyzed. Finally, we reflect on defined aspects, implementing them in a specific case of the industry, in which the time to obtain the volumes of CO₂ required is taken as crucial data, rectifying the possibility of using biogas in this type of process.

* Degree work

** Physical chemistry Faculty. Director M.Sc. ERIK GIOVANY MONTES PÁEZ

INTRODUCCIÓN

El presente trabajo de grado está impulsado por el aporte positivo a un aspecto que inquieta a la industria: la transición energética que atraviesa el mundo en la actualidad, en la que el reto consiste en su reemplazar la industria por aquellas denominadas “energías amigables” si no en proponer la incursión de esta en procesos de la industria que permitan fortalecer su característica sostenible.

Existe una variedad de energías que son potencialmente aplicables en Colombia, específicamente a procesos de la industria, de las que se podría obtener electricidad, compuestos, combustión, calor, etc. Sin embargo, teniendo en cuenta la diversidad de recursos agrícolas y pecuarios que posee el país, sumado a los beneficios que trae consigo su implementación, como el aprovechamiento de los residuos generados por otras industrias o la disminución de emisiones de gases de efecto invernadero, resulta coherente dirigir la mirada a la energía de la biomasa.

En el marco energético, el término biomasa se le otorga a una fuente de energía renovable que basa su fundamento en el uso de materia orgánica que se ha formado biológicamente o por productos derivados y que goza de su característica renovable ya que es el resultado de la conversión de la energía lumínica del sol en energía química que se emplea en segunda instancia para transformar CO₂ y agua en carbohidratos y oxígeno, denominado fotosíntesis.

Por otra parte, el biogás es un gas generado a partir de la biodegradación de biomasa que se obtiene de manera natural o haciendo uso de dispositivos específicos. La diversidad de biomasa que posee Colombia hace que la producción de biogás se facilite, adicionando que su composición es en gran medida metano (CH₄) y dióxido de carbono (CO₂) convirtiéndolo en un posible concursante para su utilización en procesos debido a que son compuestos empleados en la industria para diferentes áreas.

En la búsqueda de proponer la utilización de biogás en procesos de la industria se precisa conocer y entender los diferentes procesos y tecnologías por la cual debería atravesar la biomasa hasta llegar a su punto de destino, esta es la razón por la que se deben identificar los aspectos fundamentales que encierran esta aplicación, y con esto, proponer un caso de la industria, en el que se requieran volúmenes de gas para suministro, en mayor medida metano o CO₂.

Desde hace varios años la inyección de gas se ha implementado en campos petroleros con el objetivo de facilitar el desplazamiento del crudo. Uno de los gases más empleados en este proceso es el CO₂, el cual, al entrar al yacimiento, se solubiliza en el crudo remanente y a su vez reduce la viscosidad, esto ocurre a presiones relativamente altas. Pese a la finalidad de la inyección de CO₂, otro obstáculo se atraviesa, pues los tratamientos que requiere para mejorar su pureza sumado a la reducida variedad de fuentes de generación de CO₂ hacen que su abastecimiento se convierta en una desventaja.

En busca de una solución que integre todas las dificultades anteriormente mencionadas y aprovechando el periodo de transición energética por el que atraviesa nuestro país, se propone en el este proyecto identificar los aspectos fundamentales que permitan implementar biogás como una fuente alternativa de soporte y suministro de gas en procesos de la industria, tomando como caso de estudio la inyección de CO₂ en un campo colombiano con la finalidad de recuperación de crudo.

1. OBJETIVOS

1.1 OBJETIVO GENERAL

Identificar los aspectos fundamentales de la utilización de biogás como fuente alternativa de suministro de gas en un campo colombiano.

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Identificar los diferentes tipos de biomasa posibles para obtener biogás, así como sus procesos de transformación, mediante una revisión bibliográfica.

Definir los aspectos relevantes requeridos para la utilización de biogás como fuente alternativa de suministro en la industria del petróleo.

Proponer una aplicación para los aspectos definidas en la utilización del biogás como fuente alternativa de suministro de gas a través de un caso de la literatura.

2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

2.1 DEFINICIÓN DEL PROBLEMA

Con el propósito de mejorar la recuperación del crudo se precisan técnicas que alteran las propiedades originales del aceite para extraer el petróleo residual o solucionar problemas asociados a la composición de este. Una de estas técnicas es la inyección de gas, siendo el CO₂ de los más comunes; esta busca a través de la miscibilidad mejorar la viscosidad del crudo para proporcionar mayor fluidez al mismo y mejorar la productividad. Pese a su finalidad, esta técnica tiene limitantes que desafían a la industria constantemente; pues los grandes volúmenes requeridos, sumado a sus altos costos son impedimentos económicos.

Por otro lado, el biogás, es un gas generado por medios naturales o dispositivos específicos gracias a reacciones de biodegradación de materia orgánica. Impulsados por la búsqueda de alternativas sostenibles para la industria y asociaciones con otras industrias en Colombia, se propone el biogás obtenido de biomasa residual como una alternativa que complemente los volúmenes de gas de inyección requeridos en un proceso de recuperación, aprovechando sus características composicionales, así como el bajo costo y el gran aporte energético de la biomasa en Colombia, lo que genera las preguntas de investigación: ¿Qué aspectos fundamentales se deben considerar para la obtención de biogás y posteriormente su aplicación en procesos de la industria? ¿podría la producción de biogás considerarse como fuente alternativa de suministro de gas para un proceso de inyección de gas?

2.2 JUSTIFICACIÓN

En la industria petrolera, mucho se habla acerca del carácter finito de las reservas de hidrocarburo, sin embargo, la dificultad no solo radica en hallar nuevas reservas, sino también en extraer la mayor cantidad de crudo del yacimiento a un tiempo y costo considerable; en la búsqueda de propuestas rentables, ha ocasionado pérdidas ambientales que la hacen ver como destructiva. En este sentido, la disminución de la producción de crudo y la búsqueda actual de la inserción de energías amigables son factores que inquietan a la industria petrolera.

Desde principios del siglo XX la inyección de gas se ha puesto en práctica en campos petroleros buscando facilitar el desplazamiento del crudo; entre estas técnicas se encuentra la inyección de CO₂, la cual a través de procesos de miscibilidad disminuye la viscosidad del crudo y mejora su fluidez, lo que aumenta la productividad, sin embargo, los costos adicionales a los esperados durante el tiempo de explotación de un campo se convierten en un limitante.

Gracias al proceso de transición energética que vive Colombia, se puede hablar de variedad de recursos energéticos sostenibles con un sinnúmero de utilidades. Un ejemplo es la diversidad en biomasa que posee Colombia, al conocer sus procesos de transformación se hace posible obtener biogás con considerables cantidades de CH₄ y CO₂, siendo el último un gas empleado para inyectar a yacimientos en procesos de recuperación de crudo, que puede resultar competitivos.

Así pues, el poder determinar los aspectos fundamentales de la obtención de biogás a partir de una materia orgánica residual y el uso de este como alternativa de suministro para la inyección, significaría una nueva opción de incursión de energías renovables en la industria petrolera, aportando a la mitigación del impacto ambiental de otras industrias gracias al uso de sus residuos y a la sostenibilidad de la nuestra.

3. INTRODUCCIÓN A LA BIOMASA

Durante el siglo XX los minerales y la biomasa sostenían el desarrollo económico mundial gracias al descubrimiento de yacimientos con reservas de petróleo considerables y el posterior desarrollo en los procesos de extracción de este, cuya ventaja era la eficiencia económica que presentaban abriéndose la puerta a la investigación de nuevas tecnologías para el desarrollo de materias primas y fuentes de energía, en especial para la industria química. Durante este siglo el petróleo desplazó completamente a la biomasa en cuestión de décadas, como base del crecimiento económico, sin embargo, en la actualidad debido a la irregularidad en los precios por el abatimiento de las reservas mundiales, factores climáticos tales como el calentamiento global y a requerimientos ambientales que exigen el óptimo aprovechamiento de los recursos, se ha considerado nuevamente la alternativa del uso de la biomasa como soporte energético, por su característica renovable y amigable con el medio ambiente.¹

Tal como lo cuenta la historia, la biomasa fue usada previo a la revolución industrial como fuente de combustible, desde las funciones dentro del hogar como cocinar, hasta tareas como la elaboración de cerámica y posteriormente como combustible para las máquinas de vapor, debido a que estos usos dentro de la industria requerían una fuente de mayor energía, se pasó a sustituir por el uso del carbón lo cual disminuyó el uso de la biomasa a medida que los combustibles fósiles entraban en juego. En la actualidad la biomasa ha recuperado su papel destacado como fuente energética en diferentes aplicaciones industriales y domésticas. Por otro lado, el carácter renovable y no contaminante que tiene y el papel que puede jugar

¹ European Technology Platform For Zero Emission Fossil Fuel Power Plants. The cost of CO₂ Transport Post demonstration CCS in the EU. [s.l.]: [s.n.], 2020. 53 p.

en el momento de generar empleo y activar la economía de algunas zonas rurales, hacen que la biomasa sea considerada una clara opción de futuro.²

En la **LEY 1715 DE 2014** por medio de la cual el congreso colombiano regula la integración de las energías renovables no convencionales al Sistema Energético Nacional, se aborda el concepto de biomasa como la “energía obtenida a partir de aquella fuente no convencional de energía renovable que se basa en la degradación espontánea o inducida de cualquier tipo de materia orgánica que ha tenido su origen inmediato como consecuencia de un proceso biológico y toda materia vegetal originada por el proceso de fotosíntesis, así como de los procesos metabólicos de los organismos heterótrofos, y que no contiene o hayan estado en contacto con partículas de elementos que supongan algún grado de peligrosidad”; esto refiriéndose en sentido estricto a aquel material biológico que en el momento dado se encuentre disponible para su utilización como elemento renovable.³

Pese a lo anterior, la **Agencia Internacional de la energía (IEA)** especifica que “La bioenergía moderna no incluye el uso tradicional de la biomasa en los países en desarrollo y las economías emergentes para cocinar y calentar, utilizando fuegos abiertos ineficientes o cocinas sencillas, lo que tiene un impacto en la salud humana y el medio ambiente”⁴

² K. Kuparinen, E. Vakkilainen y T. Tynjälä, Biomass-based carbon capture and utilization in kraft pulp mills, Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change, 2019.

³ Región Administrativa Y De Planeación Especial Rap-E Y – Universidad Distrital Francisco José De Caldas. Biomasa en la región central [en línea]. Cptl06-BIOMASA-EN-LA-REGIÓN-CENTRAL.pdf, Caldas, Colombia. 2020. Disponible en Internet: <<https://regioncentralrape.gov.co/wp-content/uploads/2020/05/Cptl06-BIOMASA-EN-LA-REGIÓN-CENTRAL.pdf>>.

⁴ Correa Zúñiga, Iván, 2007, Biodigestores, Monografía, Universidad Veracruzana, México, disponible en: https://www.usfx.bo/nueva/vicerrectorado/citas/TECNOLOGICAS_20/Ingenieria%20de%20Petroleo%20y%20Gas/75.pdf.

Teniendo en cuenta las definiciones anteriores, aquellos productos denominados biomasa o que la constituyen provienen de la energía solar, que, a través de la fotosíntesis, de manera directa o indirecta, captan y transforman energía del enlace químico de las moléculas que componen el material biológico, en las etapas de oxidación relacionadas al proceso de conversión energética de la biomasa, la energía que había sido almacenada se transforma en calor. Ahora bien, el título de renovables se le adjudica ya que, a diferencia de los combustibles fósiles, la materia biológica en cuestión se considera de origen próximo, pues se formó en la atmósfera actual, misma de los que provendrían sus elementos resultantes.⁵

En cuanto al impacto ambiental, el aprovechamiento de la biomasa en materia energética no contribuye al aumento de los gases de efecto invernadero por lo que las emisiones de CO₂ en la atmósfera son neutras, ya que este es reabsorbido en el proceso de la fotosíntesis por lo tanto no aumenta el CO₂ presente en la atmósfera, de hecho, el carbono que se libera hacia la atmósfera esta fija a la tierra desde hace millones de años.⁶

Con la intención de comprender el carácter energético de la biomasa, se podría plantear un sistema bioenergético a manera de fórmula conformado por cuatro campos comprendidos desde la materia prima, hasta su uso, y que cada uno encierra características diferentes y necesarias para su aplicación como recurso renovable.⁷

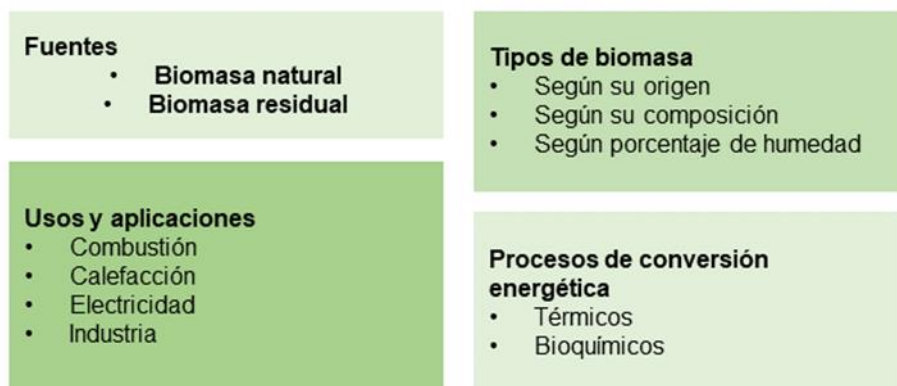
⁵ Aponte Díaz, Iván Fabricio; Velez Contreras, Juan Sebastián. Evaluación técnica y financiera del uso de un biorreactor anaerobio para el tratamiento de los residuos sólidos orgánicos generados en campo Rubiales como modelo de estandarización. 2019. Tesis de Licenciatura. Fundación Universidad de América.

⁶ K. Kuparinen, E. Vakkilainen y T. Tynjälä, Biomass-based carbon capture and utilization in kraft pulp mills, Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change, 2019

⁷ Corona Zúñiga, Iván. Biodigestores. 2007.

Figura 1. Campos de un sistema bioenergético.

Fuente + Tipo de biomasa + proceso = Usos y aplicaciones



Fuente. Material curso agro energética-UPM

3.1 FUENTES DE BIOMASA

La relevancia de la caracterización de la fuente de biomasa radica en que a partir de esta se definen diversos factores para su selección como la disponibilidad, importancia a nivel local, técnico, medioambiental y por ende económico. La fuente de la biomasa hace referencia al medio del cual esta procede en su etapa final, es decir, no tiene en cuenta dónde se desarrolló su producto en un principio.⁸

De acuerdo con distintas bibliografías, las fuentes de biomasa se podrían encerrar en dos grandes grupos:

- Biomasa natural
- Biomasa residual

⁸ D. A. Curbelo Alonso, d. A. Valdés Delgado y . D. B. Garea Moreda, «Generación de electricidad a partir de bagazo en Cuba.,» de Memoria - Reunión regional sobre generación de electricidad a partir de biomasa, Montevideo, Uruguay, Dirección de productos forestales, FAO, Roma, 1995.

3.1.1 La Biomasa Natural. Es aquella proveniente de tierras que no han sido dispuestas para fines de producción, es decir, no son cultivadas, se encuentran en la naturaleza y se ha empleado históricamente de parte de la humanidad para necesidades calóricas como la leña. Esta fuente de biomasa entra en conflicto con conceptos establecidos en algunas bibliografías ya que la biomasa como recurso energético se define como aquella que se encuentra disponible para su aprovechamiento energético, en este sentido, la biomasa natural solo sería empleada como elemento renovable haciendo uso de fracciones muertas o restos que sean resultado de la intervención humana, por esta razón, en muchos casos se hace uso de la biomasa residual.⁹

3.1.2 La biomasa residual. Tiende a ser más atractiva en términos energéticos, pues con su uso, se garantiza un ciclo sostenible medioambiental al reducirse la contaminación, costes de producción y brinda beneficios en cuanto a espacio para aquellos que producen su materia prima, así mismo promueven, en menor nivel, una autosuficiencia desde el punto de vista energético para aquellos capaces de aprovechar sus propios residuos. Dicho esto, se podría resumir la biomasa residual como aquella que es producto de las actividades de los humanos, resumen que da paso a su característica variada, pues se podría hablar de diferentes tipos de fuentes residuales, como resultantes agrícolas, pecuarios, y residuos comunes o urbanos.

- **Sector agrícola.** Uno de los sectores que más genera biomasa residual, pues a su vez está constituido por cultivos, residuos forestales y cultivos energéticos, los últimos mencionados corresponden a los desarrollados netamente

⁹ Elizabeth Tilley, Lukas Ulrich, Christoph Lüthi, Philippe Reymond, Roland Schertenleib y Christian Zurbrugg, Reactor anaerobio de flujo, Consultado en 2022, disponible en: (<https://sswm.info/es/gass-perspective-es/tecnologias-de/tecnologiasdesaneamiento/tratamientosemicentralizado/reactoranaerobiodeflijoascendente#:~:text=El%20reactor%20anaerobio%20de%20flujo,2018>).

con el propósito de producir energía en los que se emplean plantas que crezcan de manera oportuna y que no demanden mucho mantenimiento.¹⁰

- **Sector pecuario.** Las actividades pecuarias como fuente de biomasa también constituyen un amplio porcentaje dentro de las residuales y esto se debe en gran medida a el ahorro que representa en la etapa de disposición, cantidad de material, y su estado composicional hace que sea un material fácilmente fermentable, sin embargo, su alto contenido de humedad dificulta su valorización energética.
- **Sector urbano.** Los residuos generados por este sector, residuos sólidos urbanos (RSU) están asociados a un sin número de actividades desarrolladas por los humanos, y los constituye diversas materias como alimentos, vegetales a causa de las podas, madera, cartón, papel, líquidos residuales entre otros que poseen un alto valor energético debido a que al descomponerse sin ayuda de ningún procesos, generan gases como metano (CH₄) y dióxido de carbono (CO₂) , lo que hace que al aprovecharlos a través de un proceso de transformación, se puedan aprovechar en mayor medida.

En la tabla 1 se presentan las fuentes de biomasa junto a sus materias principales y algunas de sus propiedades físicas.

¹⁰ D. A. Curbelo Alonso, d. A. Valdés Delgado y . D. B. Garea Moreda, «Generación de electricidad a partir de bagazo en Cuba.,» de Memoria - Reunión regional sobre generación de electricidad a partir de biomasa, Montevideo, Uruguay, Dirección de productos forestales, FAO, Roma, 1995.

Tabla 1. Fuentes de biomasa

Fuente generadora de la biomasa	Tipo de residuo	Características físicas
Residuos forestales	Restos de aserrío: corteza, aserrín, astillas	Polvo, sólido, HR ¹ > 50%
	Restos de ebanistería: aserrín, trozos	Polvo sólido, HR 30-45%
	Restos de plantaciones: ramas, cortezas, raíces	Sólido, HR > 55%
Residuos agropecuarios	Cáscara y pulpa de frutas y vegetales	Sólido muy húmedo
	Cáscara y polvo de granos secos	Polvo, HR < 25%
	Estiércol	Sólido muy húmedo
	Tallos, hojas, cáscaras, maleza, pastura	Sólido HR > 55%
Residuos industriales	Pulpa y cáscara de frutas y vegetales	Sólido moderadamente húmedo
	Residuos de procesamiento de carnes	Sólido muy húmedo
	Aguas de lavado de carnes y vegetales	Líquido
	Grasas y aceites vegetales	Líquido gaseoso
Residuos urbanos	Aguas negras	Líquido
	Desechos domésticos orgánicos	Sólido húmedo
	Basura orgánica	Sólido húmedo

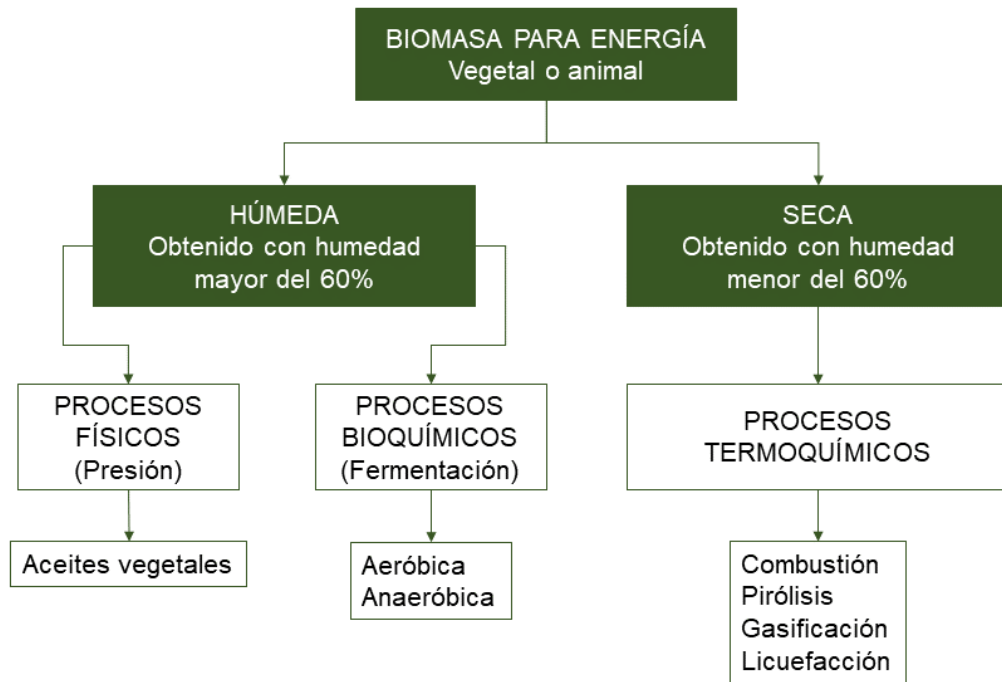
Fuente: Modificada (Biomass Users Network Centroamérica, 2002)

3.2 TIPOS DE BIOMASA

La biomasa, así como lo explica su definición abarca un amplio conjunto de materias orgánicas que se caracteriza por su heterogeneidad y tiene diferentes tipos de clasificación, desde el punto de vista energético resulta conveniente categorizar la biomasa según tres grupos diferentes:

3.2.1 Según su porcentaje de humedad

Figura 2. Clasificación de la biomasa



Fuente. El libro Energía de la biomasa

Biomasa seca. Aquella que puede obtenerse en forma natural con un tenor de humedad menor al 60%, como la leña, paja, etc. Este tipo se presta a ser utilizada energéticamente mediante procesos TERMOQUÍMICOS O FISÍCOQUÍMICOS, que producen directamente energía térmica o productos secundarios en la forma de combustibles sólidos, líquidos o gaseosos.¹¹

Biomasa húmeda. Se denomina así cuando el porcentaje de humedad supera el 60%, como por ejemplo en los restantes vegetales, residuos animales, vegetación acuática, etc. Resulta especialmente adecuada para su tratamiento mediante

¹¹ Moya Álamo, Cristian, et al. Captura de CO₂ mediante operaciones de separación basadas en líquidos iónicos. 2017.

PROCESOS QUÍMICOS, o en algunos casos particulares, mediante simples PROCESOS FÍSICOS, obteniéndose combustibles líquidos y gaseosos.¹²

3.2.2 Según su origen. Científicamente gracias a su origen se clasifica en tres grupos:

Primaria. Materia formada directamente por los seres fotosintéticos, en este sentido se incluiría toda la biomasa vegetal comprendiendo los residuos agrícolas y forestales.¹³

Secundaria. Es aquella producida por los seres heterótrofos que utilizan la biomasa en su nutrición primaria. Este tipo de biomasa implica una transformación biológica de la biomasa primaria para formar un nuevo tipo de biomasa de naturaleza distinta a la inicial. Ejemplo, la carne o las deyecciones producidas por animales herbívoros.

Terciaria. Producida por los seres que se alimentan de la biomasa secundaria, como sería el caso de los carnívoros que se alimentan de herbívoros.

3.2.3 Según su composición. Según el compuesto o grupo de compuestos preponderantes en la biomasa vegetal, esta recibe diversos calificativos. Por ser los hidratos de carbono los compuestos más abundantes de la biomasa vegetal, la designación del tipo de biomasa se realiza principalmente atendiendo a la forma en que se encuentra prioritariamente estos compuestos.

Respecto a su composición: los materiales que componen la biomasa pueden clasificarse en azucaradas, amiláceas, oleaginosas, lignocelulósicas.¹⁴

¹² Munasinghe, Mohan, et al. Value–Supply Chain Analysis (VSCA) of crude palm oil production in Brazil, focusing on economic, environmental, and social sustainability. Sustainable Production and Consumption, 2019, vol. 17, p. 161-175.

¹⁴ Muñoz, César Bartolomé; Peris, Pedro Mora; Rodríguez, José David Recalde. Estado del arte de las tecnologías de captura y almacenamiento de CO. Ficem. Org, 2011.

Biomasa lignocelulósica. Que es aquella donde predomina la celulosa y la hemicelulosa, como la paja, y la madera.

Biomasa amilácea. es aquella donde los hidratos de carbono se encuentran en forma de polisacáridos como el almidón, como ejemplos sirven los cereales y las patatas.

Biomasa azucarada. Es aquella cuyo componente son azúcares sean monosacáridos o disacáridos tales como la fructosa y la sacarosa presente en la remolacha, en la caña de azúcar entre otros.

3.3 PROCESOS DE TRANSFORMACIÓN DE LA BIOMASA

Una vez entendido los tipos de biomasa y sus fuentes de obtención, se hace necesario abordar el proceso que se lleva a cabo para su aprovechamiento, existen diversas técnicas que comprenden métodos térmicos, bioquímicos, que dependen de la biomasa que se quiera transformar, a esto se le denomina conversión energética, del cual se obtienen productos gaseosos, líquidos y sólidos para diferentes usos, que se mencionarán en el siguiente apartado.

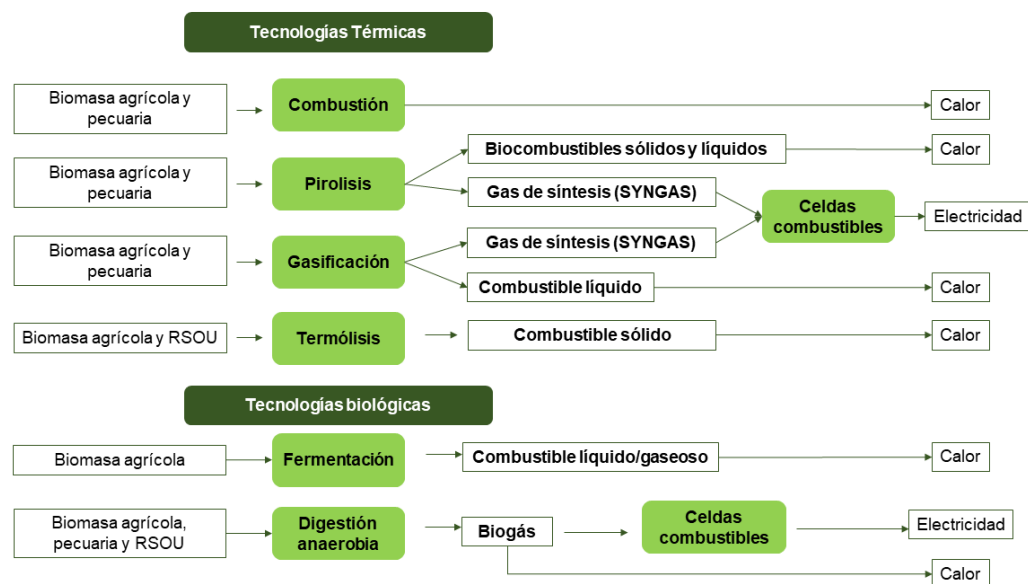
En la literatura se encuentra un sin número de clasificaciones de la biomasa, por ende, así misma diversidad de métodos para su conversión energética, sin embargo, la figura 3 se establecen los procesos de transformación de la biomasa más empleados por sus completas características y que dependen del tipo de biomasa.

3.3.1 Métodos térmicos. Son los métodos de transformación de la biomasa que requieren calor, generalmente se usan materiales con poca humedad se reconocen 4 tipos:

Combustión. Existe cuando quemamos la biomasa con mucho aire (20-40% superior al teórico) a una temperatura entre 600 y 1.300°C.

Pirólisis. Se trata de descomponer la biomasa utilizando el calor (a unos 500°C) sin oxígeno. A través de este proceso se obtienen gases formados por hidrógeno, óxidos de carbono e hidrocarburos, líquidos hidrocarbonatos y residuos sólidos carbonosos.

Figura 3. Transformaciones energéticas de la biomasa.



Fuente: Atlas del Potencial Energético de la Biomasa en Colombia (UPME) Modificada

Gasificación. Según se utilice aire u oxígeno, se crean dos procedimientos de gasificación distintos. Por un lado, el gasógeno o “gas pobre” y por otro el gas de síntesis. Este último transformarse en combustibles líquidos (metanol y gasolinas)

y de ahí su importancia. Por eso se están haciendo grandes esfuerzos que tienden a mejorar el proceso de gasificación con oxígeno.

Existe cuando hay una combustión y se producen diferentes elementos químicos: monóxido de carbono (CO), dióxido de carbono (CO₂), hidrógeno (H) y metano (CH₄), en cantidades diferentes. La temperatura de la gasificación puede estar entre 700 y 1.500°C y el oxígeno entre un 10 y un 50%.

Co-combustión. Consiste en la utilización de la biomasa como combustible de ayuda mientras se realiza la combustión de carbón en las calderas. Con este proceso se reduce el consumo de carbón y se reducen las emisiones

3.3.2 Métodos bioquímicos. Estos métodos se caracterizan por usar microorganismos y por usar biomásas con humedades altas, se reconocen 2 grupos:

Fermentación alcohólica. Es una técnica que consiste en la fermentación de hidratos de carbono que se encuentran en las plantas y en la que se consigue un alcohol (etanol) que se puede utilizar para la industria.

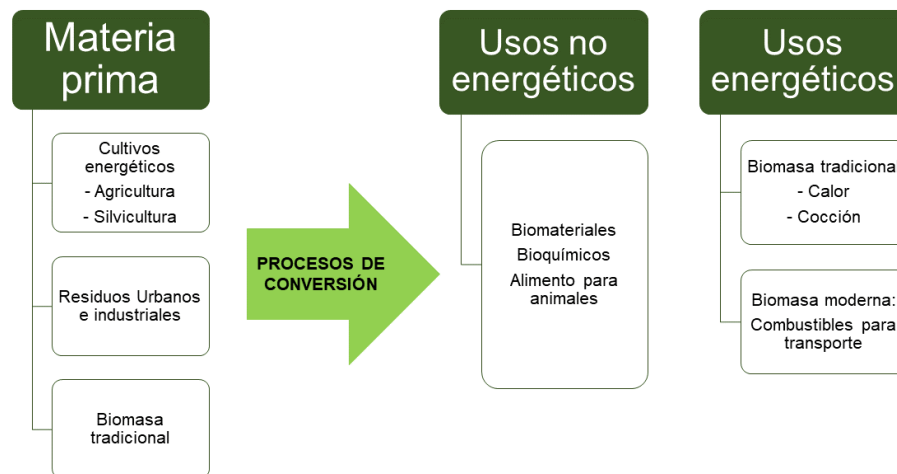
Fermentación metánica. Es la digestión anaerobia (sin oxígeno) de la biomasa, en la que la materia orgánica (Estiércol, residuos agrícolas, lodos de aguas residuales, residuos urbanos sólidos o líquidos, residuos de la industria alimentaria) se descompone en biogás mediante grupos de microorganismos en ausencia de oxígeno.

3.4 USOS Y APLICACIONES DE LA BIOMASA

La biomasa desde el punto de vista energético se usa comúnmente en las plantas de generación o en la producción combinada de calor y energía, ya sea como combustible sólido o gaseoso, además se emplea como materia prima en la producción de biocombustibles utilizados en el transporte, la figura 4 muestra un esquema básico de los procesos para la conversión de la biomasa, que de acuerdo con su aplicación se separan como tradicional y moderna.

La biomasa representa casi el 50 % de la energía renovable consumida en el mundo. Su demanda creció lentamente a una tasa media de crecimiento del 1.3% anual durante el periodo de 1990 a 2010. Con respecto a la biomasa moderna, se espera que su demanda aumente a un ritmo anual del 9% hasta 2020, ya que algunas compañías eléctricas a nivel mundial se encuentran en la búsqueda de fórmulas como la Co-combustión de carbón y biomasa, o la transformación de centrales para generar solo con la última mencionada.

Figura 4. Esquema general del uso de la biomasa



Fuente: BIOCMBUSTIBLES, Y. BIOMASA, BIOCMBUSTIBLES Y SOSTENIBILIDAD. Modificada.

Si a la gran variedad de biomasa existente se le aplican distintas tecnologías, el resultado es energía que puede utilizarse de diferentes formas, éstas pueden ser

para calefacción, refrigeración y producción de agua caliente en el sector doméstico, calor para procesos industriales y generación de electricidad. En conclusión, todo el conjunto de fuentes energéticas que comprende la biomasa puede tener tanto aplicaciones térmicas como eléctricas.

3.4.1 Producciones de energía. A través de sistemas de combustión directa. Se utilizan para dar calor, que se puede utilizar directamente para, por ejemplo, cocinar alimentos o secar productos agrícolas. También se pueden aprovechar para hacer vapor para la industria o para generar electricidad. Su mayor inconveniente es la contaminación que generan.

3.4.2 Producción de biocombustibles. Son una alternativa a los combustibles tradicionales del transporte y tienen un grado de desarrollo desigual en los diferentes países. Existen dos tipos de biocombustibles:

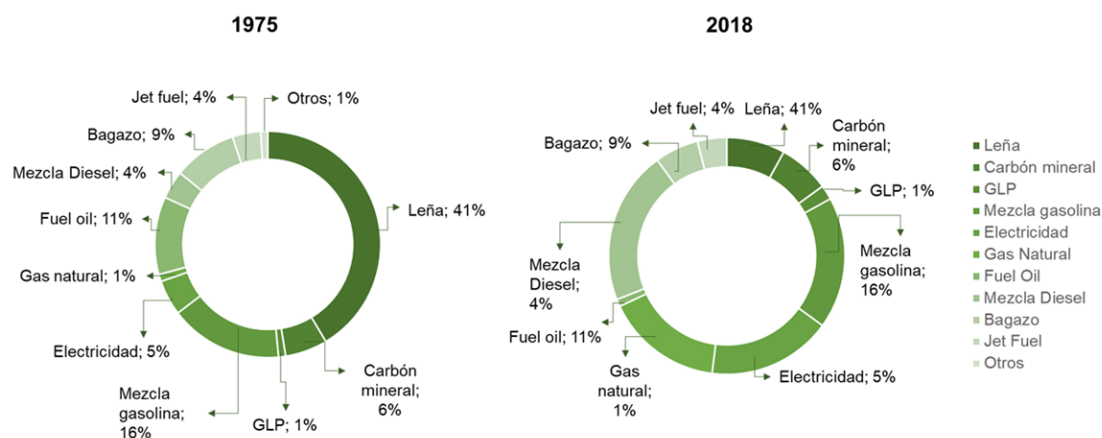
- *Bioetanol. Sustituye a la gasolina. En el caso del etanol actualmente se obtiene de cultivos tradicionales como el cereal, el maíz y la remolacha.*
- *Biodiesel. Su principal aplicación va dirigida a la sustitución del gasoil. En un futuro servirá para variedades orientadas a favorecer las calidades de producción de energía.*

Como se ha podido evidenciar, la aplicación de la biomasa principalmente va direccionada hacia su aprovechamiento energético como combustible y obtención directa de calor, sin embargo, al hacer uso de una biomasa específica y un método de transformación adecuado para la biomasa se puede obtener biogás, este, además de tener ventajas energéticas, tiene propiedades composicionales que se podrían emplear en diferentes procesos, en tercer capítulo del presente proyecto, se planteará una propuesta alternativa para la utilización de las ventajas composicionales del biogás dentro de un área de la industria del petróleo.

4. CONTEXTO BIOMASA EN COLOMBIA

Como lo afirma la UPME Colombia compone la oferta de la energía primaria de combustibles fósiles (carbón y petróleo), de más del 70% del total a diferencia de la energía hidroeléctrica, el gas natural y las fuentes no convencionales de energía renovable (FNCER) como lo son los biocombustibles y la biomasa en general. Históricamente, Colombia ha evolucionado en temas de demanda y oferta de energía, el consumo energético final entre 1975 y 2018 aumentó en un 78% pasando de 735 PJ a 1.308 PJ, este aumento, se explica principalmente por el alza del consumo en la industria manufacturera y en el sector transporte, por ende, el incremento en estos sectores contrasta con la disminución de consumo de energía del sector residencial que era intensivo años atrás. En la figura 5, se muestran la participación porcentual de fuentes de energía, datos tomados de la última actualización del “Plan energético nacional de Colombia: ideario energético 2050”:¹⁵

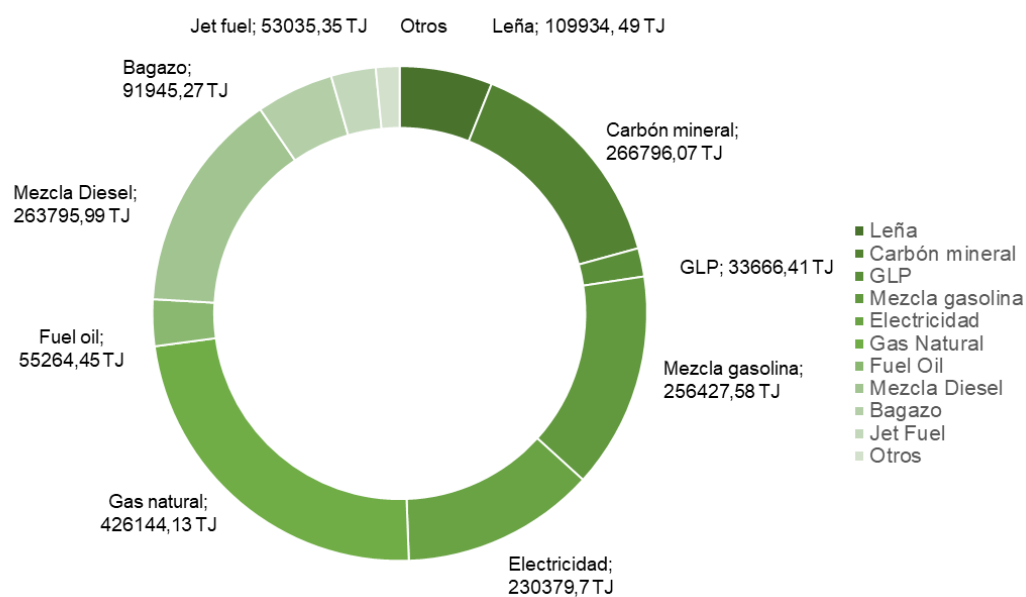
Figura 5. Participación porcentual de fuentes de energía en la composición de la oferta 1975 – 2018.



¹⁵ Marroig Martínez, Gabriel. Unidad de separación de gases ácidos de GNL de la planta Gorgón en Barrow Island. 2015.

Así mismo, de manera complementaria, la evolución en el 2020 de estos sectores energéticos en Colombia ha tenido un cambio significativo el cual se puede evidenciar en la figura 6, cuyos datos fueron tomados del Balance Energético Colombiano (BECO) actualizado hasta el 2020.

Figura 6. Participación en la oferta interna bruta (TJ).



Actualmente, contamos con las bases de datos del BECO (Balance Energético Colombiano) de la UPME que nos permite conocer hoy el contexto de la participación de las fuentes energéticas y especialmente conocer en términos de biomasa cuál es el panorama en Colombia según el último reporte entre el 2006 y el 2020.

El bagazo entre los energéticos primarios al año 2019 tiene una mínima participación en la oferta interna energética del país, siendo esta de 0,09M lo mismo que su participación en la producción.¹⁶

¹⁶ Perfetti, Juan José, et al. Políticas para el desarrollo de la agricultura en Colombia [en línea]. LIB_2013_Políticas para el desarrollo de la agricultura_Completo.pdf, Bogotá, Colombia. Abril, 2013.

Figura 7. Participación del bagazo en la producción energética primaria 2006 – 2020. [50]



Fuente: UNIDAD DE PLANEACIÓN MINERO ENERGÉTICA, UPME. Balance energético colombiano. <https://www1.upme.gov.co/DemandayEficiencia/Paginas/BECO.aspx> [página web]. (2020).

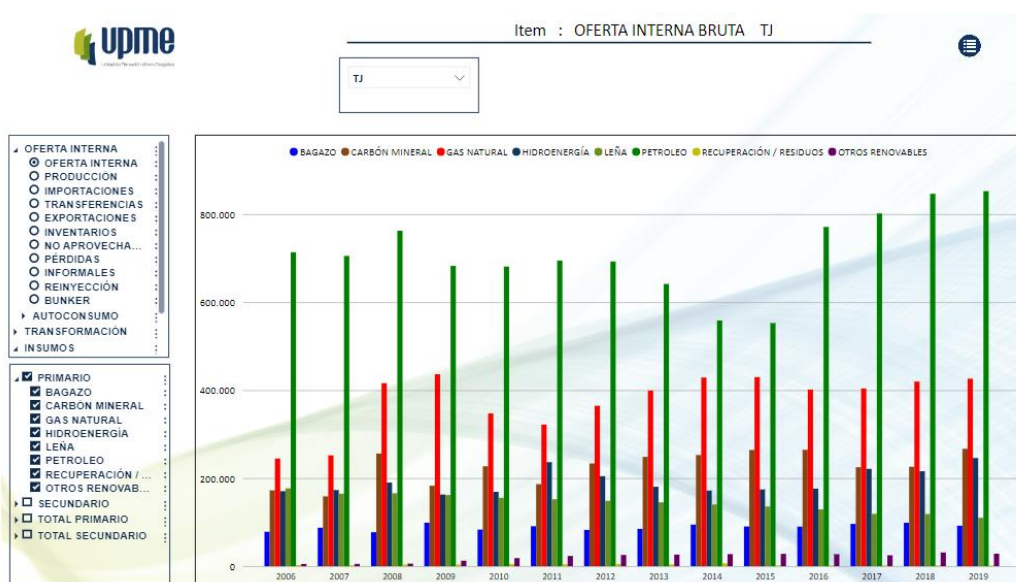
De la misma forma, en la figura 8 se presentan los datos hasta el año 2019 de la oferta interna bruta. Para el caso del bagazo, 91.945,27 TJ de aporte.

La biomasa en el mundo y en Colombia ha sido la fuente de energía convencional con un importante papel en la canasta energética de los países, esencialmente en países subdesarrollados. En la gran mayoría de los municipios de Colombia y zonas rurales de escasos recursos, existe aún gran implementación de este energético dado a sus fuentes de ingreso como la agricultura, entre otros.

Disponible en Internet:
https://www.repository.fedesarrollo.org.co/bitstream/handle/11445/61/LIB_2013_Políticas%20para%20el%20desarrollo%20de%20la%20agricultura_Completo.pdf?sequence=1&isAllowed=y.

Particularmente la canasta energética del país es relativamente completa, con 93% de recursos primarios de origen fósil, 4% de hidroenergía y 3% de biomasa y residuos aproximadamente; para el caso de la biomasa, con el potencial se puede obtener biogás con el fin que se puedan utilizar para la generación de electricidad, calefacción, cocinar, y como combustible vehicular, entre otros.¹⁷

Figura 8. Participación del bagazo en la oferta interna energética primaria 2006 – 2020.



Fuente: Morales, Hernán Y Torres, Cristian. Tecnologías de captura y secuestro de, [s.l.]: [s.n.], 2008. 52 p.

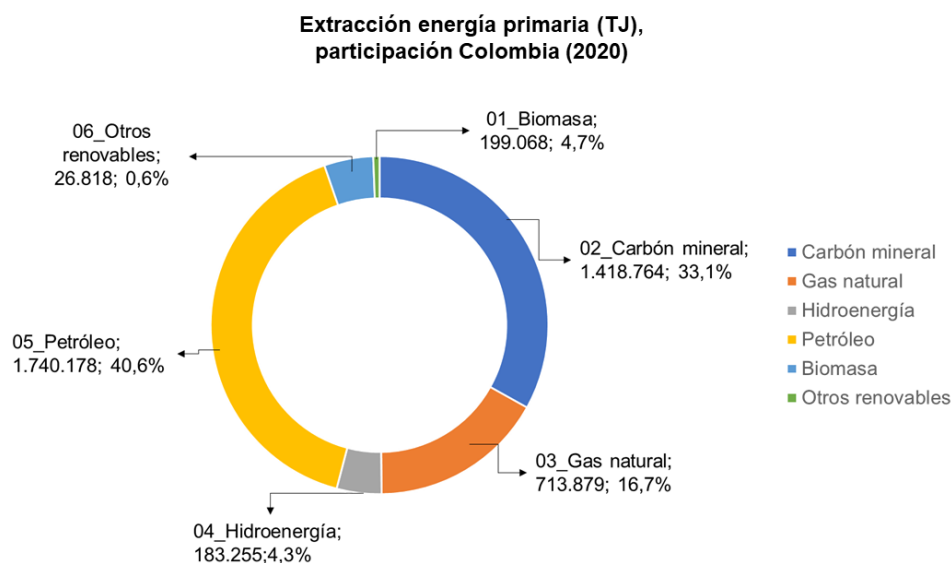
En este capítulo se pretende mostrar el potencial de la biomasa a través del sector agrícola entre los que se encuentran: arroz, maíz, banano, café, caña de azúcar, caña de panela, palma de aceite y plátano; y en el sector pecuario, entre los cuales están los residuos avícola, bovino y porcino. Partiendo de lo anterior, según Perfetti “en Colombia se hace necesarios esquemas integrales de manejo de residuos de biomasa (ej. residuos del arroz, café, cacao, banano, y otros cultivos) que

¹⁷ Morales, Hernán Y Torres, Cristian. Tecnologías de captura y secuestro de, [s.l.]: [s.n.], 2008. 52 p.

incorporen el aprovechamiento energético y el desarrollo de tierras productivas con objeto de cultivos energéticos importantes para el crecimiento y modernización del sector agropecuario.¹⁸

En Colombia el producto agropecuario que más se produce es el de la palma de aceite, de este se generan al año 3 millones de toneladas de biomasa. La biomasa proveniente de la palma de aceite genera grandes retos económicos por la complejidad y durabilidad de la cosecha de este cultivo.¹⁹

Figura 9. Extracción energía primaria (TJ), participación en Colombia 2020.



Fuente: BALANCE ENERGÉTICO COLOMBIANO – BECO 2020 – Subdirección de demanda.

¹⁸ Morero, Betzabet; Campanella, Enrique A. Simulación del Proceso de Absorción Química con Soluciones de Aminas para la Purificación Biogás. Información tecnológica, 2013, vol. 24, no 1, p. 25-32.

¹⁹ IEA, Special Report on Carbon Capture Utilization and Storage. CCUS in clean energy transitions., International Energy Agency, 2020.

4.1 DISPONIBILIDAD DE LA BIOMASA PARA SU APROVECHAMIENTO

4.1.1 Sector agrícola. La biomasa residual en este sector está conformada por los subproductos que se generan durante los procesos de recolección y transformación de las cosechas, definidos como residuos agrícolas de cosecha y residuos agroindustriales. En este caso se representan los cultivos, la de generación de biomasa residual y el porcentaje de participación en la producción agrícola nacional.²⁰

Con la finalidad de conocer el potencial de generación de biogás de las biomásas residuales, se recolectan estadísticas agrícolas en Colombia de producción y disposición de los residuos. En cuanto al sector agrícola se estimó la disponibilidad de biomasa residual a partir del factor de generación de este con respecto a la producción del producto principal, tomado del Atlas de potencial energético de la Biomasa Residual en Colombia²¹, así en la Tabla 2 se presentan los principales departamentos productores de cada sector y su producción (t/año).

Tabla 2. Producción de cultivos principales por departamentos. Sector agrícola

Sector	Departamento	Producción producto principal [t/año]
Arroz	Casanare	695.395,0
	Tolima	341.942,0
	Meta	314.574,7
Banano	Antioquia	1.246.209,0
	Magdalena	413.790,0
Café	Huila	154.853,0

²⁰ P. Angy, "Propuesta de parámetros de diseño de un reactor UASB para el tratamiento de aguas residuales porcinas", 2018.] / [R. Méndez, "Evaluación de un reactor UASB para aguas porcinas inoculado con líquido ruminal" 2013

²¹ P. Angy, "Propuesta de parámetros de diseño de un reactor UASB para el tratamiento de aguas residuales porcinas", 2018.] / [R. Méndez, "Evaluación de un reactor UASB para aguas porcinas inoculado con líquido ruminal" 2013

	Antioquia	119.971,0
	Tolima	105.988,0
	Otros*	150.624,0
Maíz	Córdoba	143.816,0
	Otros**	200.729,0
	Meta	116.622,0
	Tolima	97.839,0
Palma de aceite	Meta	488.364,0
	Casanare	213.354,0
	Santander	200.180,0
	Cesar	194.184,0
Plátano	Antioquia	525.991,0
	Otros***	310.078,0
	Meta	302.607,0
Caña de azúcar	Valle de cauca	19.180.062,3
	Cauca	4.210.028,9
Caña panelera	RAP-E	351.028,0
	Santander	226.294,0
	Otros***	170.634,0

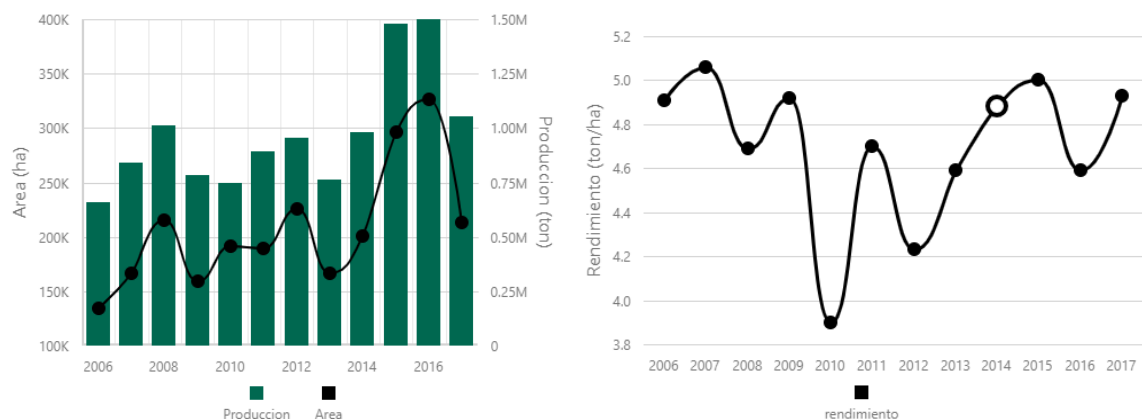
Fuente: RAP-E: Boyacá y Cundinamarca. Grupo de investigación en procesos químicos y bioquímicos de la facultad de ingeniería de la Universidad Nacional de Colombia y Centro de desarrollo industrial TECSOL. Estimación del potencial de conversión a biogás de la biomasa en Colombia y su aprovechamiento. Bogotá D.C: [s.n.], 2018. 216 p. CONTRATO 001 DE 2017 UPME-UNAL. Informe Final.

4.1.1.1 Arroz. Es característico del recurso la baja densidad y dificultad de recolección en el cultivo para el aprovechamiento del tamo; por su parte la cascarilla tiene un alto contenido de ligninas y sílice lo que no favorece su degradabilidad.

A nivel de residuos agrícolas, el arroz está en los primeros puestos de aporte con la cascarilla y el tamo en los productores principales de biomasa residual. A pesar de que se han desarrollado estudios para la producción de Biogás, actualmente tiene otros usos como quema directa, uso como sustrato en cultivos de flores y caballerizas, esto sumado a su baja biodegradabilidad no ha motivado proyectos de

biogás en este sector. Para el caso del arroz, se encuentra una mayor representación en Casanare, ya que cuenta con el 51,44% de la producción de arroz [t/año], la región RAP-E, cuenta con un 48,56% ubicado en Meta y Tolima.²²

Figura 10. Arroz - Evolución de producción, área cosechada y rendimiento de cultivo



Fuente: ESTADÍSTICAS home [Anónimo]. Agro net Mincultura [página web]. Disponible en Internet: <<https://www.agronet.gov.co/estadistica/Paginas/home.aspx?cod=1>>”.

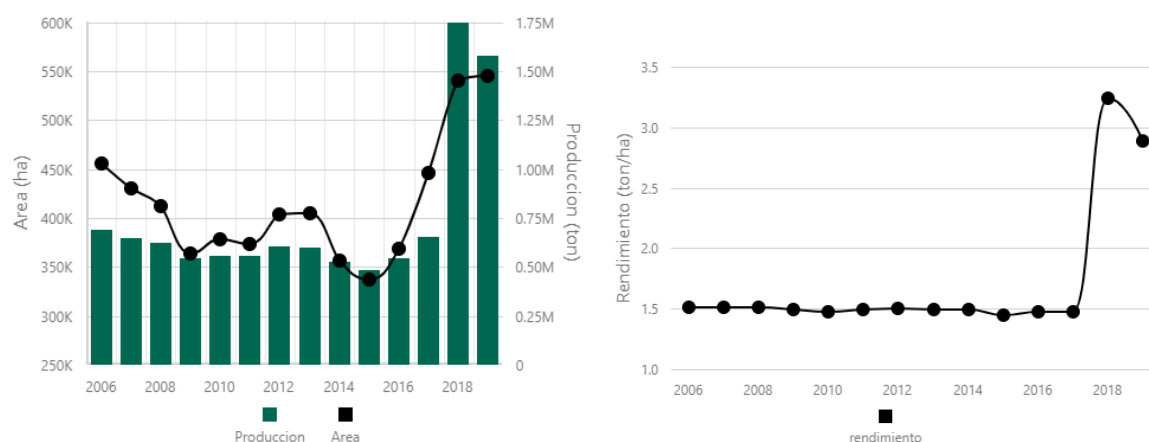
4.1.1.2. Maíz. Esta biomasa se utiliza con otros fines diferentes a la obtención de biogás y lo que queda en el cultivo es muy dispersa y en pequeñas granjas, que dificulta su acopio y aprovechamiento.

El sector bananero ha manifestado su interés en adelantar proyectos de biogás para aprovechar los residuos de la preparación del banano para exportación, sumado a la ubicación en zonas no interconectadas (Urabá Antioqueño) y la Responsabilidad Social. Empresarias que manifiesta el gremio con las poblaciones de influencia, potencializa la oportunidad para este tipo de proyectos. Proyectos donde Se retiró

²² European Technology Platform For Zero Emission Fossile Fuel Power Plants. The cost of CO2 Transport Post demonstration CCS in the EU. [s.l.]: [s.n.], 2020. 53 p.

la cáscara y se desintegró el banano para obtener la pulpa. Para tratarla térmicamente a 70°C durante 1 hora. Con este tratamiento se busca además de disminuir la flora nativa, provocar una gelificación e hidrólisis del almidón presente y facilitar la acción de los microorganismos anaerobios.²³ Los departamentos representativos del cultivo de banano son Antioquia y Magdalena, donde predomina Antioquia con un 75.07% y lo sigue Magdalena con un 24,93%.

Figura 11. Maíz - Evolución de producción, área cosechada y rendimiento de cultivo



Fuente: Tomada de “ESTADÍSTICAS home [Anónimo]. Agronet Mincultura [página web].

Disponible en Internet: <<https://www.agronet.gov.co/estadistica/Paginas/home.aspx?cod=1>>”.

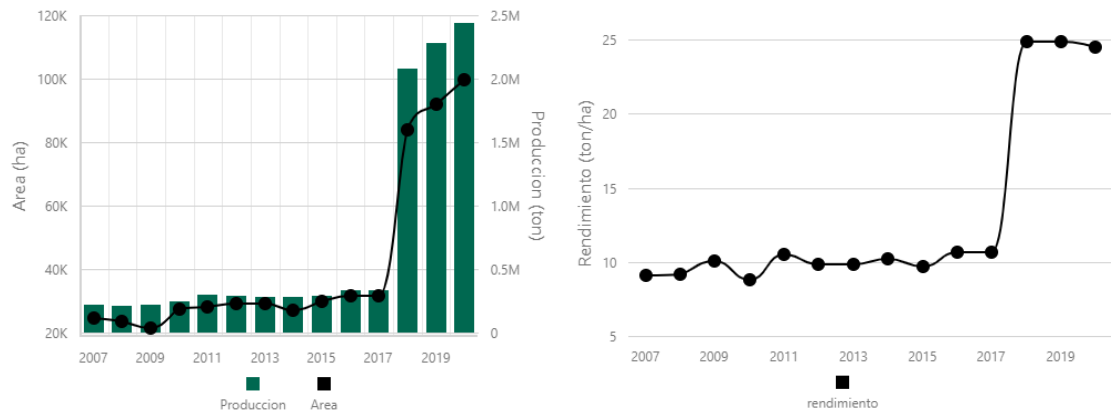
4.1.1.3. Banano. Concentración de la producción en áreas con topografía plana y facilidad de transporte manual dentro de las granjas del área de beneficio hacia el cultivo y viceversa que promueve su aprovechamiento.

Este cultivo predomina el departamento de Antioquia con 22,47%, seguido por el Meta con 12,93% en representación de la región RAP-E, para el panorama Nacional

²³ Gámez, Nancy; Cobo, Martha. Purificación de dióxido de carbono emitido en plantas de tratamiento de gas. Ciencia en Desarrollo, 2018, vol. 9, no 2, p. 137-148.

se encuentran los departamentos de Arauca, Valle del Cauca, Córdoba, Quindío y Chocó, con un porcentaje de producción inferior al 20%.

Figura 12. Banano - Evolución de producción, área cosechada y rendimiento de cultivo



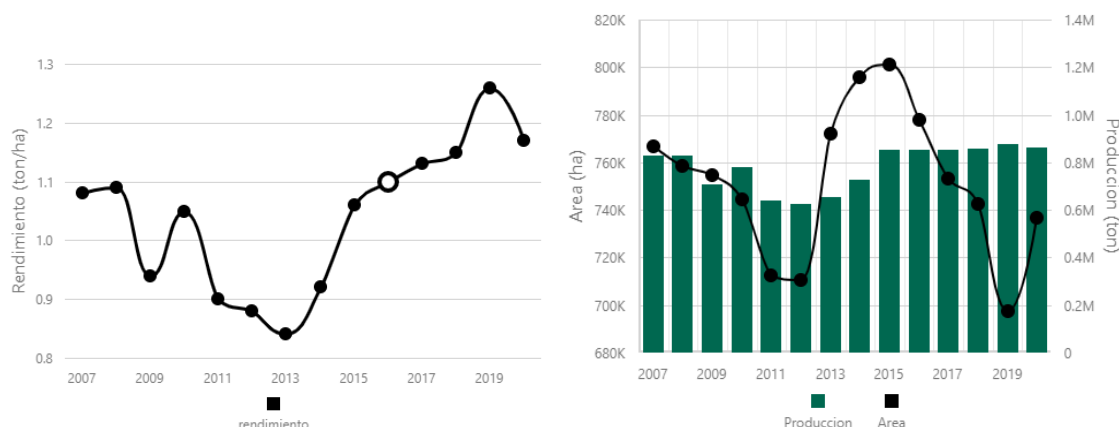
Fuente. Tomada de “ESTADÍSTICAS home [Anónimo]. Agronet Mincultura [página web].
Disponible en Internet: <<https://www.agronet.gov.co/estadistica/Paginas/home.aspx?cod=1>>”.

4.1.1.4 Café. Para los proyectos de generación de biogás, la fácil biodegradabilidad y las características de este cultivo son factores propicios. Pese a ello, la poca cantidad de espacios ocupados por pequeños productores no aportan al auge de los proyectos a gran escala, así mismo, los terrenos tortuosos y quebrados de las zonas productoras de café no favorecen la valorización regional.

Para este tipo de cultivo se está desarrollando una estrategia sectorial en la que se plantean proyectos de acopio y beneficio que agrupen la cosecha de varias granjas pequeñas centralizando la gestión ambiental y por ende promoviendo procesos de valorización energética estos residuos. La región RAP-E, para el café está representada por el Tolima, con un 19,94%, la cual presenta el menor porcentaje de producción. Los departamentos que presentan un mayor porcentaje para el panorama nacional son Huila con un 29,14%, seguido por Antioquia con un 22,57%

y otros* departamentos los cuales se tomaron como un solo valor el cual representa el 28,34%.²⁴

Figura 13. Café - Evolución de producción, área cosechada y rendimiento de cultivo.



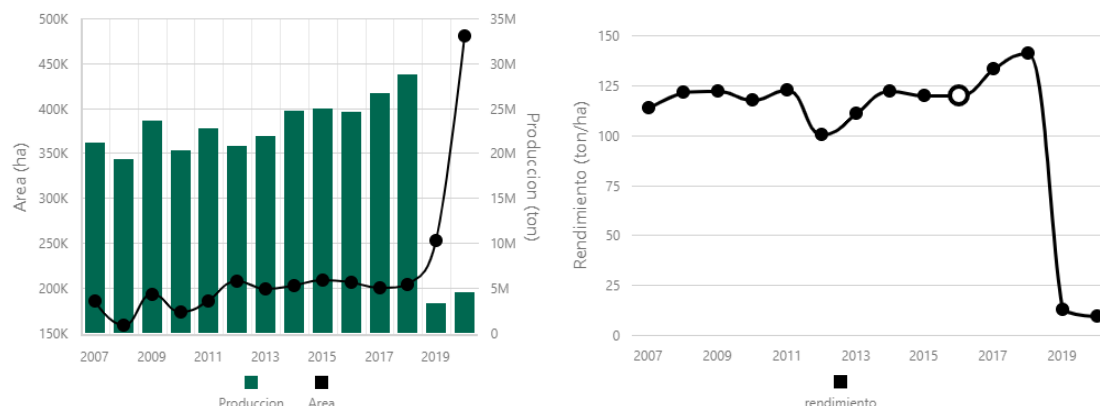
Fuente. Tomada de “ESTADÍSTICAS home [Anónimo]. Agronet Mincultura [página web].
Disponible en Internet: <<https://www.agronet.gov.co/estadistica/Paginas/home.aspx?cod=1>>”.

4.1.1.5 Caña de azúcar. El bagazo actualmente se utiliza para combustión directa. La caña de azúcar en el valle del Cauca hace parte de un sector que, dada la grata experiencia de cogeneración con bagazo, está abierto a todas las oportunidades que se presenten para la valorización energética de sus biomásas residuales, explorando diversas alternativas para el aprovechamiento del RAC, con proyectos liderados por CENICAÑA²⁵. Dicho cultivo se encuentra representado por el Valle del Cauca ya que presenta una producción de 82%, seguido por el cauca con una producción mucho menor como es el 18%.

²⁴ D. A. Curbelo Alonso, d. A. Valdés Delgado y . D. B. Garea Moreda, «Generación de electricidad a partir de bagazo en Cuba.,» de Memoria - Reunión regional sobre generación de electricidad a partir de biomasa, Montevideo, Uruguay, Dirección de productos forestales, FAO, Roma, 1995.

²⁵ Gámez, Nancy; Cobo, Martha. Purificación de dióxido de carbono emitido en plantas de tratamiento de gas. Ciencia en Desarrollo, 2018, vol. 9, no 2, p. 137-148.

Figura 14. Caña de azúcar - Evolución de producción, área cosechada y rendimiento de cultivo.



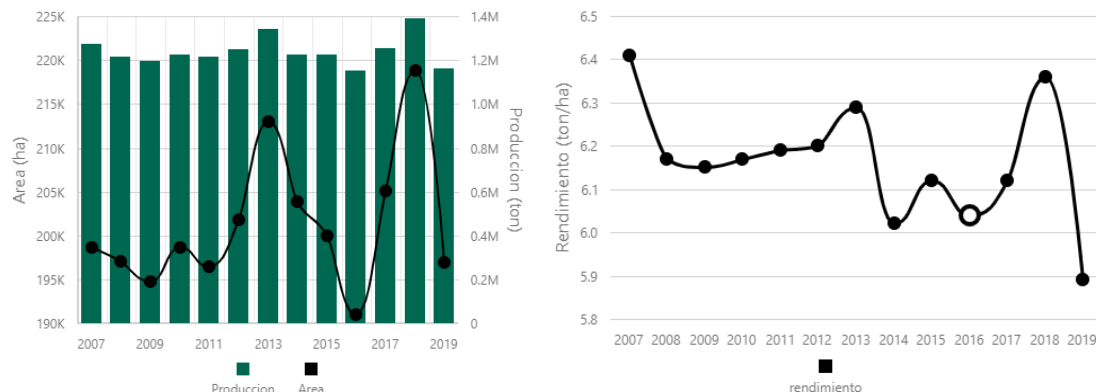
Fuente: Tomada de “ESTADÍSTICAS home [Anónimo]. Agronet Mincultura [página web]. Disponible en Internet: <<https://www.agronet.gov.co/estadistica/Paginas/home.aspx?cod=1>>”.

4.1.1.6 Caña de panela. A diferencia de la caña de azúcar este sector es minifundista, por lo tanto, la cantidad de biomas disponible es baja y se usa como combustible en el trapiche.

En cuanto al gremio de la caña panelera, se están liderando proyectos de eficiencia energética y energías alternativas ²⁶. Su aprovechamiento se ve representado por el departamento de Santander con un 26,63%, seguido por la Región RAP-E, la cual está conformada por Boyacá y Cundinamarca, produciendo un total de 41,3%. Seguido por Santander cuya producción representa un 26,63% y otros departamentos del panorama nacional, como son Antioquia y Nariño, los cuales presenta una producción inferior al 21%, la suma de dichas producciones arroja un porcentaje de producción del 32,07%.

²⁶ European Technology Platform For Zero Emission Fossile Fuel Power Plants. The cost of CO2 Transport Post demonstration CCS in the EU. [s.l.]: [s.n.], 2020. 53 p.

Figura 15. Caña de panela - Evolución de producción, área cosechada y rendimiento de cultivo.

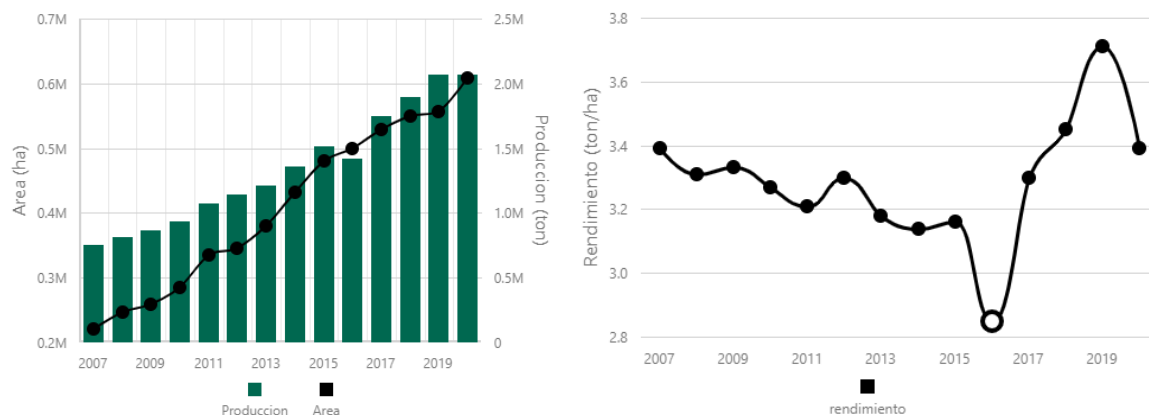


Fuente: Tomada de “ESTADÍSTICAS home [Anónimo]. Agronet Mincultura [página web]. Disponible en Internet: <<https://www.agronet.gov.co/estadistica/Paginas/home.aspx?cod=1>>”.

4.1.1.7 Palma de aceite. Ya cuenta con la infraestructura de lagunas de tratamiento de aguas que facilitan los procesos de captura y aprovechamiento de biogás. Actualmente se desarrollan procesos de optimización para mejorar eficiencia y se realizan estudios para el aprovechamiento de otras biomásas del proceso. (Figura 16)

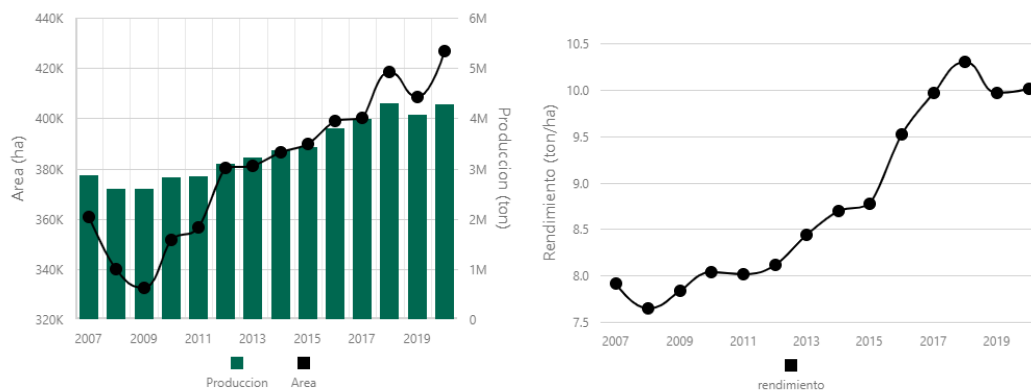
4.1.1.8 Plátano. Concentración de la producción en áreas con topografía plana y facilidad de transporte manual dentro de las granjas del área de beneficio hacia el cultivo y viceversa que promueve su aprovechamiento. En los últimos años se evidencia un incremento de su producción con fines de exportación. (Figura 17)

Figura 16. Palma de aceite - Evolución de producción, área cosechada y rendimiento de cultivo.



Fuente: Tomada de “ESTADÍSTICAS home [Anónimo]. Agronet Mincultura [página web]. Disponible en Internet: <<https://www.agronet.gov.co/estadistica/Paginas/home.aspx?cod=1>>”.

Figura 17 Plátano - Evolución de producción, área cosechada y rendimiento de cultivo.



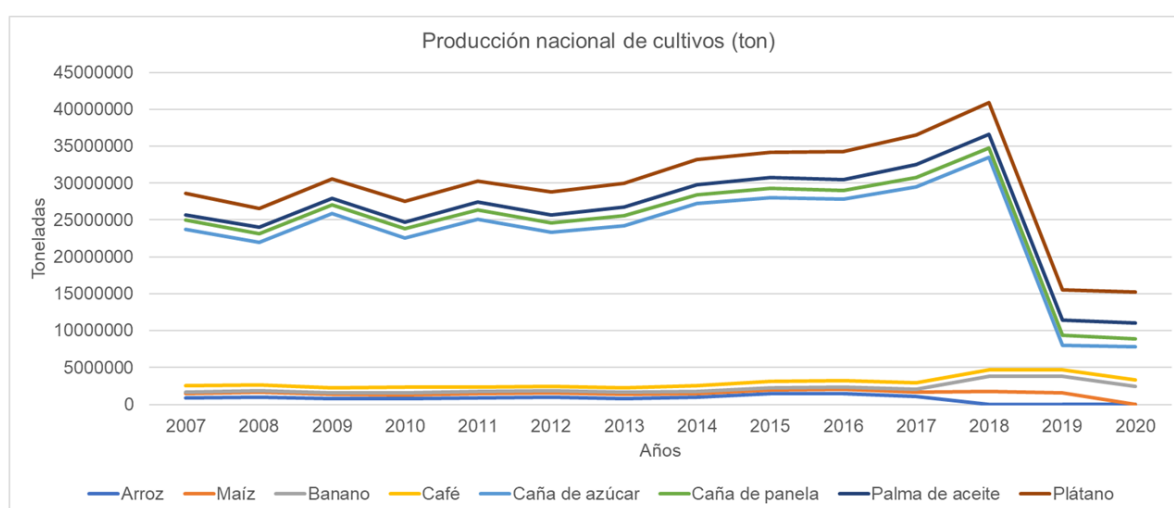
Fuente: “ESTADÍSTICAS home [Anónimo]. Agronet Mincultura [página web]. Disponible en Internet: <<https://www.agronet.gov.co/estadistica/Paginas/home.aspx?cod=1>>”.

Para este estudio es indispensable conocer el potencial de disposición de la materia orgánica o biomasa según la localización municipal anual de los residuos de

cultivos, será se podrá seleccionar la biomasa con la que se trabajará para la generación de biogás de manera eficiente.

Ahora, a través de la siguiente tendencia es posible observar la diferencia entre las biomásas del sector agrícola y cómo ha cambiado al 2020 desde el más reciente reporte realizado por la UPME.

Figura 18. Producción por cultivo a nivel nacional (ton).



Fuente. Agronet Mincultura ESTADÍSTICAS. Agronet

4.1.2 Sector pecuario. El sector pecuario en Colombia se distingue en las clases de explotación del ganado porcino, bovino y avicultura. En el 2020 el sector agropecuario creció en un 6.8%

Los mayores volúmenes de biomasa residual se dan por el estiércol porcino encontrado en el municipio de Iza Boyacá como mezcla de sólidos de estiércol y agua de lavado de las porquerizas.

En la tabla 3 se muestran los datos de producción más recientes correspondientes al sector pecuario.

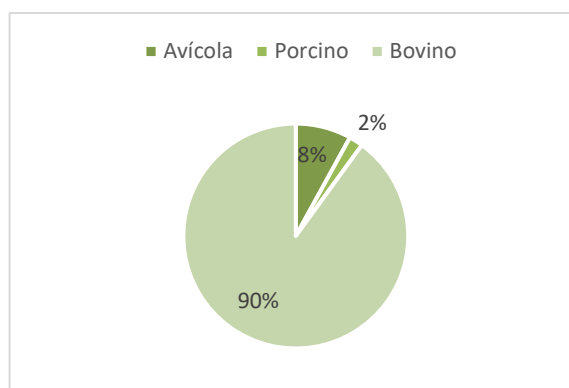
En la figura 19 se encuentra representada la participación de la producción a nivel nacional de los elementos del sector pecuario, en la que se evidencia la relevancia para la disponibilidad de residuos que representa el sector bovino.

Tabla 3. Producción de residuos por departamentos. Sector pecuario.

Tipo de residuo	Departamento	Producción residuo t/año
Avícola	Santander	1.545.541
	Cundinamarca	1.362.656
	Valle	860.273
	Antioquia	495.459
Porcino	Antioquia	869.050
	Cundinamarca	247.710
	Valle del Cauca	157.080
	Meta	135.657
Bovino	Antioquia	9.813.919
	Caquetá	7.248.929
	Córdoba	7.160.440
	Meta	6.300.053
	Santander	5.214.237
	Caldas	4.991.392
	Cauca	4.975.034
	Magdalena	4.435.235

Fuente. Grupo de investigación en procesos químicos y bioquímicos de la facultad de ingeniería de la Universidad Nacional de Colombia y Centro de desarrollo industrial TECSOL. Estimación del potencial de conversión a biogás de la biomasa en Colombia y su aprovechamiento. Bogotá D.C: [s.n.], 2018. 216 p. CONTRATO 001 DE 2017 UPME-UNAL. Informe Final.

Figura 19. Producción de residuo pecuario [t/año].



Ahora bien, el resumen las biomásas priorizadas para la generación de biogás en Colombia se desarrolla en la tabla 4, las cuales sin ser necesariamente las de mayor oferta energética, son las que presentan mayor posibilidad de desarrollo e incorporación a la matriz energética nacional como energía firme ya sea para uso en generación eléctrica, como biometano a través de la red o vehicular o aplicaciones térmicas a nivel industrial y doméstico.

Tabla 4. Potencial energético de los sectores priorizados.

Tipo de residuo	Sector	Biogás (TJ/año)
Pecuario	Avícola	3.601
	Porcicola	2.120
Agrícola	Palma de aceite	3.073

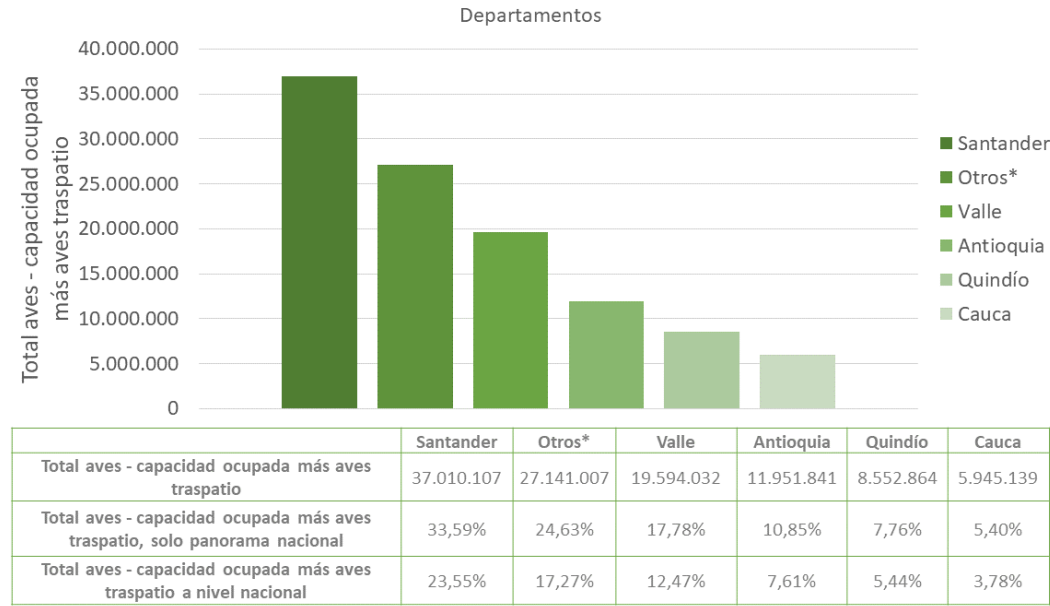
Fuente: Grupo de investigación en procesos químicos y bioquímicos de la facultad de ingeniería de la Universidad Nacional de Colombia y Centro de desarrollo industrial TECSOL. Estimación del potencial de conversión a biogás de la biomasa en Colombia y su aprovechamiento. Bogotá D.C: [s.n.], 2018. 216 p. CONTRATO 001 DE 2017 UPME-UNAL. Informe Final.

4.1.2.1 Avícola. La industria avícola en Santander y Cauca está bastante bien desarrollada contando con empresas que manejan un importante número de galpones que albergan una gran cantidad de aves, lo que facilita el aprovechamiento del residuo. En Colombia la avicultura presenta dos niveles de desarrollo la

Avicultura tradicional y la Industrializada, en nuestro caso es de interés particular la industrializada por ser la que ofrece una biomasa residual con potencial de ser aprovechada.

Las aves dedicadas al área de engorde están relacionadas con unos desechos de bajo contenido de humedad, esto principalmente debido a su combinación con el material implementado para las camas; mientras que las demás aves, específicamente las de postura, reflejan más claramente la composición original del estiércol avícola, es decir unos excrementos con altos contenidos de humedad.

Figura 20. Capacidad ocupada del total de aves. Panorama nacional.



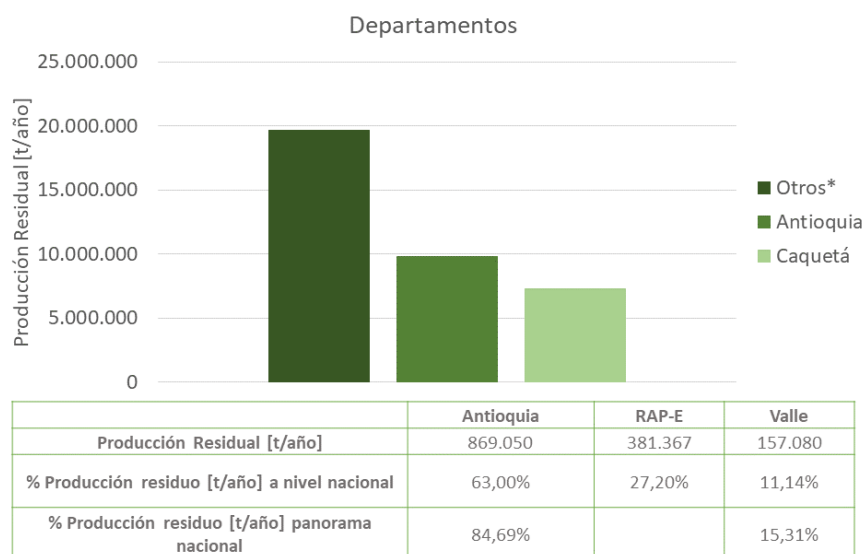
Fuente: Grupo de investigación en procesos químicos y bioquímicos de la facultad de ingeniería de la Universidad nacional de Colombia y centro de desarrollo industrial TECSOL, «Estimación del potencial de conversión a Biogás de la biomasa en Colombia y su aprovechamiento,» Bogotá D.C., 2018.

4.1.2.2 Porcicola. El espacio reducido en el que se desarrolla este sector propicio la recolección de una mayor cantidad de los residuos producidos. Para determinar

el potencial energético que este sector puede aportar a cada departamento existen dos variables fundamentales: la población porcina y la cantidad de estiércol que producen, donde se evidencia la relación directa entre ellas, de forma que a mayor número de cabezas mayor masa de residuo

En Meta, Antioquia y Cundinamarca, existen empresas que maneja importantes números de cabezas de manera tecnificada, lo que centraliza la oferta del residuo.

Figura 21. Panorama nacional Vs RAP- Producción residuo [t/año] – Porcino.



Fuente: Grupo de investigación en procesos químicos y bioquímicos de la facultad de ingeniería de la Universidad nacional de Colombia y centro de desarrollo industrial TECSOL, «Estimación del potencial de conversión a Biogás de la biomasa en Colombia y su aprovechamiento,» Bogotá D.C., 2018.

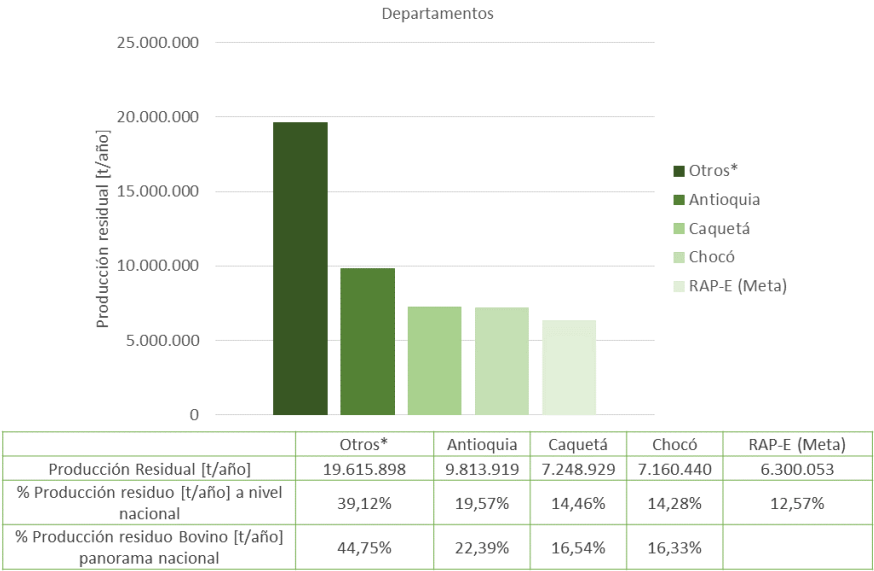
4.1.2.3 Bovino. El sector ganadero es de suma importancia para el país, como lo prueban las cifras que se presentan a continuación tomadas de portafolio de septiembre 27 de 2016. Según datos del presidente de la unión Nacional de Asociaciones Ganaderas.²⁷

²⁷ Corona Zúñiga, Iván. Biodigestores. 2007.

El sector ganadero en Colombia es extensivo y Antioquia no es la excepción, así con un promedio de 1 cabeza por hectárea su aprovechamiento resulta prácticamente imposible.

La región RAP-E, se encuentra conformada por una producción de 6.300.053 t/año, correspondientes al departamento del Meta, la cual para la región RAP-E representa un 100%, mientras a nivel nacional representa un 12,565% para la producción de residuo bovino. El panorama nacional por el contrario está conformado por distintos departamentos, donde se encuentra información de otros (Santander, Caldas, Cauca y Magdalena), los cuales representa a los departamentos que presentan una participación inferior al 11,89% de la producción de residuo, la suma de dichos departamentos presenta a nivel nacional una participación de 39,123%, mientras en solo el panorama nacional presenta un 44,745%, los departamentos que siguen son Antioquia, Caquetá y Córdoba.

Figura 22. Panorama nacional – Producción residuo [t/año] – Bovino.



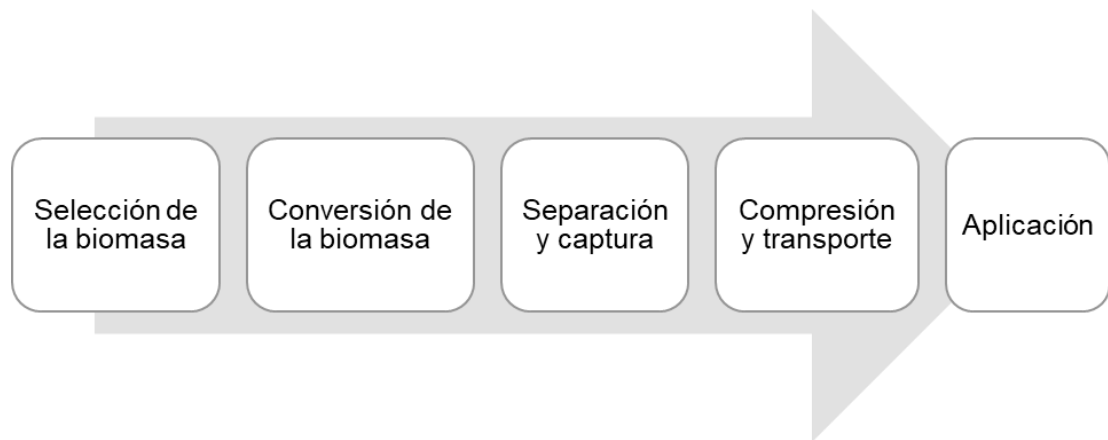
Fuente: Grupo de investigación en procesos químicos y bioquímicos de la facultad de ingeniería de la Universidad nacional de Colombia y centro de desarrollo industrial TECSOL, «Estimación del potencial de conversión a Biogás de la biomasa en Colombia y su aprovechamiento,» Bogotá D.C., 2018.

Además del contexto del potencial en Colombia, hay que expresar que somos ricos en biomasa por diversidad de cultivos y muchas zonas y por ende si quisiéramos hacer uso de una biomasa idónea para un proceso industrial en Colombia nos serviría realizar una caracterización de los tipos de biomasa respecto a los tipos de residuos se puede obtener una matriz donde se evalúe el potencial y disponibilidad en el país.

5. IDENTIFICACIÓN DE LOS ASPECTOS FUNDAMENTALES

La biomasa atraviesa por diferentes etapas para su conversión en biogás, así como para su aplicación, la literatura plantea que por lo general, el proceso se caracteriza por depender del tipo de biomasa con la cual se esté trabajando, es por esta razón que el listado de tales aspectos lo encabeza la selección de la biomasa a emplear, el cual debe ser un proceso riguroso ya que de este dependerá el desarrollo de los siguientes: selección del sistema de conversión, procesos y tecnologías de la separación y captura, medios de transporte del gas a emplear, así como también costos asociados a los aspectos mencionados.

Figura 23. Aspectos fundamentales para la obtención y uso del biogás.



5.1 SELECCIÓN DE LA BIOMASA

En este capítulo se presenta una alternativa de metodología para el estudio y selección de una materia prima, con el propósito de emplearla en un proceso de aprovechamiento energético. Se precisa usar este método debido a la gran variedad de biomasa en Colombia y con la intención de hacer uso de aquella que más se ajuste a las necesidades de un proyecto energético.

Con respecto al proceso de selección de la biomasa, se desarrollaron dos etapas, estableciendo la primera como un filtro, y con el fin de obtener datos más certeros

y convenientes en la segunda etapa de selección. Es importante resaltar que la información presentada a continuación surge de la recopilación literaria planteada en el primer objetivo del presente proyecto.

Tal como se ha comentado en párrafos previos, el biogás es el gas procedente de la transformación de biomasa, esta característica lo convierte en un compuesto con un sin número de escenarios, pues, existen muchos candidatos para su generación, y más aún si se tiene en cuenta el contexto agropecuario de Colombia, en el que hay gran variedad, es por esto, que, si se quiere estudiar el comportamiento del biogás para cualquier caso, se torna imprescindible conocer a detalle la biomasa con la que se pretende producirlo.

5.1.1 Correlación campos-Residuos orgánicos (agrícolas- pecuarios). Para la identificación de la biomasa, se empleó una correlación entre campos petroleros en Colombia y Disponibilidad de residuos orgánicos, de modo que factores como localización, facilidad de acceso y transporte, se consideran fundamentales en el proceso de selección.

Teniendo en cuenta lo anterior, se partió desde lo más general, el mapa de Colombia, en el que se identificaron los campos petroleros que se encuentran en etapa de producción, siendo clasificados por departamentos, esta información se obtuvo del portal de la *Agencia Nacional de Hidrocarburos*, en los archivos *actualizados de “Áreas en explotación”*.

Una vez precisadas las zonas de interés, se procedió a localizar los municipios donde se encuentran cultivos y criaderos de animales, con el fin de conocer los residuos con los que se podría contar, esta información se extrajo del *Atlas de Potencial Energético de la Biomasa residual en Colombia*, encabezado por la UPME, en el que se detallan ocho tipos de residuos agrícola y estiércol de tres especies animales, como se muestra en la tabla 5 y 6.

Para efectos de visualización al establecer la correlación, se asignaron íconos determinados a cada tipo de biomasa tal como lo muestra la tabla 5. De la misma manera, con la intención de detallar la disponibilidad de una biomasa determinada en una zona específica, se fijó una convención por color, descrita de la siguiente manera en las figuras 25 y 26:

En ese sentido, la correlación entre departamentos petroleros y disponibilidad de biomasa para el departamento de Santander se evidencia a continuación. Las correlaciones para cada uno de los departamentos se encuentran en los **Anexos: Mapas** del documento.

Figura 24. Distribución de la biomasa en el departamento de Santander

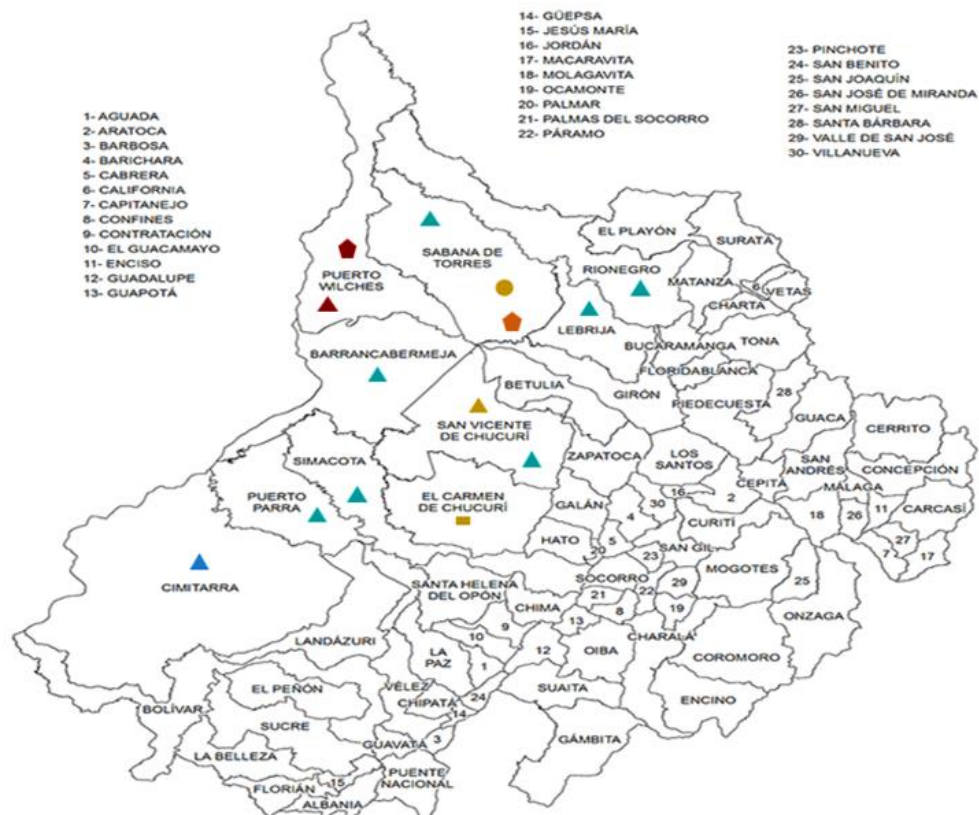


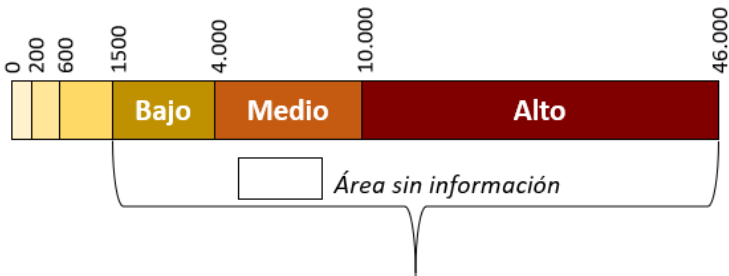
Tabla 5. Tipos de residuos agrícolas (Convención)

TIPO DE RESIDUO	IDENTIFICACIÓN
Arroz	●
Maíz	▲
Banano	■
Café	▴
Caña de azúcar	◆
Caña de panela	⬡
Palma de aceite	⬠
Plátano	—

Tabla 6. Tipos de residuos pecuarios (Convención)

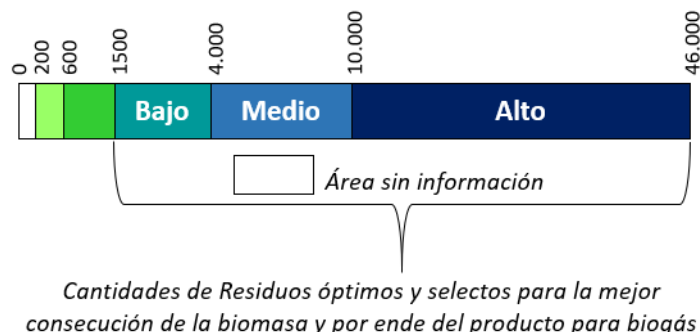
TIPO DE RESIDUO	IDENTIFICACIÓN
Avícola	●
Bovino	▲
Porcino	■

Figura 25. Disponibilidad de residuos agrícolas



Cantidades de Residuos óptimos y selectos para la mejor consecución de la biomasa y por ende del producto para biogás

Figura 26. Disponibilidad de residuos pecuarios



Como ha sido resaltado, es fundamental tener en cuenta las distancias entre zonas petroleras y municipios de obtención de la fuente de biomasa, por esta razón, sumado a esto, con el ánimo de hacer más específico el proceso de filtración, se escogieron las biomاسas con mayor disponibilidad y se relacionaron con los departamentos en el que más se presentaban, se estimó la disponibilidad de biomasa residual relacionando el factor de generación de la misma con respecto a la producción del producto principal, es del Atlas de potencial energético de la Biomasa Residual en Colombia²⁸ en este sentido, en la Tabla 7 se presentan las biomاسas seleccionadas, junto a las locaciones petroleras más cercanas a cada sector, su producción de residuos (t/año) y su participación porcentual en el mercado nacional.

²⁸ D. A. Curbelo Alonso, d. A. Valdés Delgado y . D. B. Garea Moreda, «Generación de electricidad a partir de bagazo en Cuba.,» de Memoria - Reunión regional sobre generación de electricidad a partir de biomasa, Montevideo, Uruguay, Dirección de productos forestales, FAO, Roma, 1995.

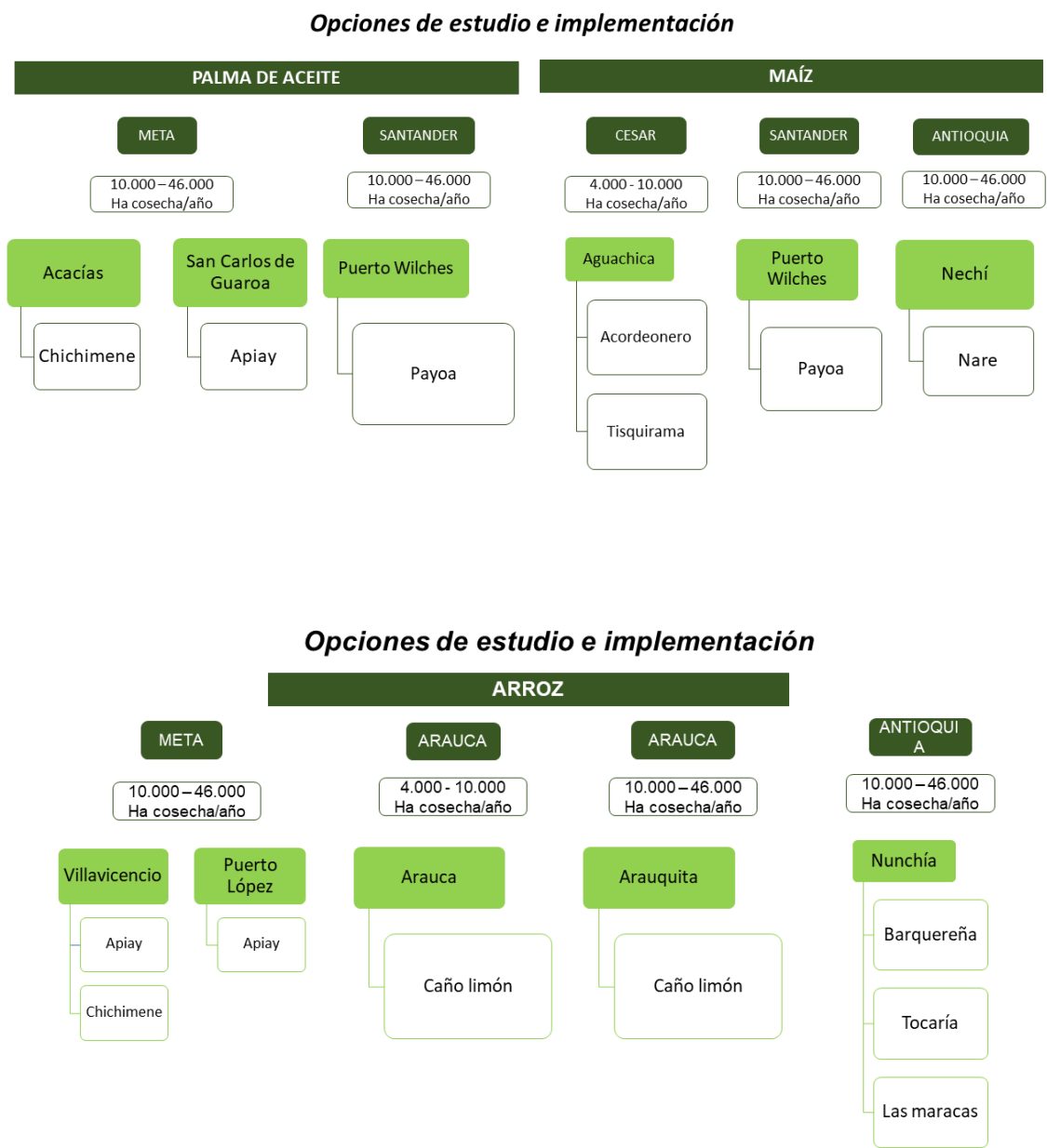
Tabla 7. Participación porcentual en el mercado nacional

Residuo	Local 1	Local 2	Local 3	Local 4	Participación porcentual en Colombia
Arroz	Acacias, Castilla, Castilla Norte, Chichimene SW, Chichimene, Meta	Acordionero – CESAR	Yariguí cantagallo	Casabe - ANTIOQUIA	20 – 30 %
Palma de aceite	Castilla, castilla Norte, Chichimene SW	La cira, Infantas.	-	-	30 – 70%
Maíz	La cira, infantas	Caño limón	-	-	77 – 15 %
Banano	Casabe - ANTIOQUIA	-	-	-	50 %
Bovino	Rubiales, Quifa, Ocelote, Akacias, Castilla Norte, Chichimene SW, Chichimene-META	Infantas, la cira	Pauto sur	-	11,8 %

Conociendo la información, se seleccionaron las biomásas con mayor disponibilidad, e interés por ser zonas petroleras con importante aporte de hidrocarburo, quedando finalmente el *arroz*, *maíz* y *palma de aceite* como candidatos para la etapa número dos, como se muestra en la figura 27.

5.1.2 Matriz de selección. En la primera etapa se estableció una correlación en la que se filtró las biomásas con mayor disponibilidad de residuo en las locaciones de interés, correspondiente a zonas petroleras, quedando en estudio los residuos de maíz, arroz y palma de aceite.

Figura 27. Opciones de estudio e implementación



La adecuada selección de la materia residual para generar biogás permite abordar dos aspectos fundamentales que propone el presente proyecto de grado, por un lado en el marco técnico la composición de la biomasa a emplear dirigirá las bondades del biogás y por ende se podrían o no tener resultados cercanos a los que se espera, en un escenario positivo, un gas que se pueda inyectar como método de recobro, y en el segundo lugar, pero no menos importante, se encuentra el marco económico, que rige gran parte de las disposiciones de proyectos en la industria, este aspecto lo determina la disponibilidad y locación de la biomasa en juego, que, nuevamente, en una situación conveniente estaría cerca al campo de interés y por supuesto en grandes cantidades.

Los criterios de priorización que se emplean en el proceso de selección se basan en la búsqueda de un proyecto sostenible, por esta razón abarcan dimensiones ecológicas, técnicas, sociales y ambientales.

La calificación de los criterios se regirá por un método multicriterio de “agregación de criterios” con el que se obtendrá un resultado más probable del conjunto de caracteres establecidos, a través del producto de los aspectos para tener en cuenta y un resultado final perteneciente a la sumatoria de dichos productos.

Tabla 8. Estructura general matriz Richman.

Indicador	Peso	Valor	Calificación
Indicador 1	Peso 1	Valor 1	C1 (Peso 1 x valor 1)
Indicador n	Peso n	Valor n	Cn (Peso n x valor n)
Total	$\sum 1,00$		Ct= $\sum C_i$

Fuente: Basnuevo & Et Al. 2014; 25(2) Tomado de: Selección de recursos web de patentes como fuente de información para los estudios de tendencias tecnológicas. Modificado.

5.1.2.1 Criterios de selección. A continuación se mencionan los criterios a emplear junto a las unidades de medición y el área de interés al que pertenecen.

Disponibilidad anual del residuo se refiere a la relación de residuo que produce con respecto a la materia aprovechable.

Generación de biogás: Volumen de biogás que se puede generar a partir de las biomazas residuales establecidas en estudio.

Impactos ambientales y sanitarios: estado actual del manejo y disposición que se le da de a la biomasa residual en cuestión.

Área de Influencia: Toma en cuenta la facilidad de recolección y cercanía de la biomasa para su aprovechamiento.

Potencial uso de la red como biogás: posibilidad de transporte en la red de gasoductos.

Disponibilidad de biomasa para su aprovechamiento: Enmarca las condiciones en las que se encuentra la biomasa para el manejo de esta.

Tabla 9. Criterios de selección

Criterio	Unidades	Clasificación
Disponibilidad anual del residuo	Residuo T/año	Técnico
Generación de biogás	m ³ /T	Técnico
Efectos ambientales y sanitarios	*Manejable (1) *Difícil manejo (0)	Ambiente
Área de influencia	*Cercano en industrias (3) generadoras de residuos *Cercano a galpones	Económico

Criterio	Unidades	Clasificación
	(2) *Disperso como residuo de cosecha (1)	
Potencial uso de la red como biogás	*Gasoductos cercano (3) *Gasoducto medianamente cercano (2) *Gasoducto a larga distancia (1)	Económico
Disponibilidad de biomasa para su aprovechamiento	*Fácil manejo (3) *Mediana dificultad (2) Difícil manejo (1)	Técnico

5.1.2.2 Evaluación y justificación de criterios. En esta sección se expone la evaluación de los criterios que se han establecido para la respectiva etapa de calificación, los criterios de carácter técnicos han sido obtenidos del tratamiento de datos de estadísticas nacionales y valores estandarizados de factor de generación de biogás para cada biomasa, por otro lado los criterios económicos, sociales y ambientales se rigen de la consideración de los autores, teniendo en cuenta la literatura y soportándose en los portales de los gremios encargados de cada biomasa.

Disponibilidad anual de residuo. La cantidad de residuo correspondiente a la biomasa se obtuvo de cálculos realizados por los autores del *Anexo E* del documento “*Potencial energético departamental de la biomasa residual*”, en el que se ayudaron de información especificada por los gremios de cada uno de los sectores y cultivos además de caracterizaciones de muestras de biomasa residual desarrolladas con fin investigativo

Generación del biogás. Si se requiere conocer la cantidad de biogás que puede producir una determinada biomasa al sufrir un proceso de conversión energética es necesario recurrir a la literatura, en la que se presenta estimaciones de factores de

producción de metano y biogás obtenidos por ensayos de laboratorio o simulaciones composicionales.

De acuerdo con hallazgos bibliográficos, para obtener los datos de factor de generación de biogás de una biomasa en específico, es necesario llevar un proceso a cabo, que en términos generales consiste en:

- *Estimar el contenido energético a partir de su contenido químico.*
- *Se consulta el peso de residuos orgánicos producidos en la central con la que se está trabajando.*
- *Se clasifican los residuos orgánicos producidos por la actividad central.*
- *Se determina la composición típica de cada uno de los residuos.*
- *Se corre una simulación de reactor o el proceso en cuestión que determine el volumen del biogás teniendo en cuenta su potencial teórico y factible.*
- *Se estima el contenido energético haciendo uso de la fórmula **Dulong**, la cual facilita evaluar el poder calorífico de cualquier combustible en función del carbono, hidrógeno, oxígeno y azufre.*
- *Por último, se emplea el modelo de **Tchobanoglous, Theisen, & Vigil**, con el cual se determina el volumen de biogás.*

Impactos ambientales y sanitarios. Se analiza la relación entre la industria y comunidades en términos ambientales, teniendo en cuenta la aceptación de los involucrados con respecto a la disposición de los residuos, y en qué medida les es conveniente o no el manejo de estos. Existen prácticas inadecuadas que impiden el buen desarrollo de las comunidades cercanas a los cultivos, en el caso del arroz, se producen quemas abiertas que generan gases de efecto invernadero y que ocasionan problemas respiratorios, por otro lado, al presentarse inundaciones en

las cosechas se produce una alta carga inorgánica en las aguas de escorrentía y asimismo emisiones de metano debido a su descomposición.²⁹

El panorama de la palma de aceite se torna crítico en este criterio, ya que es considerado uno de los cultivos que más afectaciones ambientales ocasiona, pues genera efluentes en su proceso de extracción del aceite que tienen un alta carga orgánica, aceite residual que no tiene un uso posterior, alto contenido en fósforo, nitrógeno y potasio, sumado a su característico PH ácido, haciendo necesario que los efluentes atraviesen un proceso de tratamiento para luego ser dispuestos, que en algunos casos no es manejado con la normativa adecuada ya que resulta costoso.

En el ámbito ambiental el maíz lleva la delantera, ya que los residuos productos del proceso se emplean como alimento para animales o para arreglos del suelo en los cultivos y campo, haciendo que no se evidencien impactos en mayor escala.

Área de Influencia. En este criterio se valora la cercanía entre los cultivos de un mismo tipo de biomasa, es decir la existencia de una zona dedicada netamente a un cultivo, esto se tiene en cuenta ya que de acuerdo con su concentración se tendrá mayor o menos facilidad de aprovechamiento, pues en el caso de no encontrarse localizada en una zona específica, se debe desarrollar una logística para su recolección, transporte y almacenamiento más robusta, que por consiguiente limita en tiempo y costo un proyecto.

Para la evaluación de este criterio se trajo a colación la correlación establecida en el *Anexo* , en la que se evidencian las áreas de concentración de los diferentes tipos de residuos a nivel nacional, dando como resultado que los cultivos de arroz y palma de aceite se encuentran ubicados estratégicamente y concentrados en su mayoría

²⁹ Network, Biomass Users. BUN-CA. 2002.

en zonas específicas del país como son Casanare y Meta, respectivamente, por otra parte, los cultivos de Maíz se encuentran dispersos y gran parte de sus residuos son aprovechados por zonas pecuarias aledañas.

Potencial uso de la red como biogás. Con el beneficio de la producción y utilización de biogás se despierta una nueva necesidad de transporte de este, con la que resulta imposible no pensar en la posibilidad de emplear rutas ya dispuestas para el transporte de combustible fósil, debido a su ya identificado, parecido composicional, por esta razón es pertinente detectar las redes de gasoductos cercanos a las zonas de concentración de la biomasa en cuestión, dirigiéndose al mapa de *Red nacional de gasoductos de gas natural en Colombia*, proponiendo un puntaje de tres a aquella zona de actividad de biomasa que tenga un gasoducto cercano, y uno a la que no.³⁰

Disponibilidad de biomasa para su aprovechamiento. Al hablar de disponibilidad, no solo se hace referencia al volumen de residuo con el que se pueda contar, que no está de más mencionar, va ligado a cultivo o materia inicial; la disponibilidad para su aprovechamiento encierra el proceso al cual debe someterse tal residuo para ser empleado y transformado en biogás, algunos de estos procesos de preparación son separación, moliendas, recolección por filtración, entre otros. De igual manera, para efectos de desarrollo de la matriz se estableció un peso de tres para aquella biomasa que se considera de fácil aprovechamiento y uno en la que se torna complejo su utilización. En cuanto al arroz, se generan inconvenientes con su recolección y por ende para el aprovechamiento del Tamo, sumado a esto cuenta con un proceso tardío de degradabilidad debido a su contenido en ligninas y sílice; como se ha mencionado con anterioridad, el residuo de maíz cuenta con usos que ya se llevan a cabo, además su carácter disperso hace que no sea rentable su recolección y por ende dificulta el aprovechamiento.

³⁰ Morales, Hernán Y Torres, Cristian. Tecnologías de captura y secuestro de, [s.l.]: [s.n.], 2008. 52 p.

Debido a la regulación estipulada, la palma de aceite en su mayoría cuenta con lagunas en las que son tratados los residuos que produce, el estado del arte de este proceso indica que se están desarrollando tecnologías para su optimización en cuanto a la captura de biogás generado en las lagunas.

5.1.2.3 Calificación de los criterios. La tabla 10 muestra las calificaciones otorgadas a cada criterio basándose en el contexto actual de cada una de las biomásas que se están desarrollando, los cuales fueron justificados en el apartado anterior.

Tabla 10. Calificación de criterios para cada tipo de biomasa

Criterio	Arroz	Maíz	Palma de Aceite
Disponibilidad anual del residuo (T/año)	1.351.912	559.006	4.982.192
Generación de biogás (m ³ /T)	352	514	514
Efectos ambientales y sanitarios	1	0	1
Área de influencia	3	3	3
Potencial uso de la red como biogás	2	2	2
Disponibilidad de biomasa para su aprovechamiento	1	1	3

5.1.2.4 Homogenización de los criterios. Siguiendo el proceso descrito por la matriz y evidenciando la dispersión que se presenta en cuanto al rango de los valores, se hace necesario homogenizarlos, con el fin de obtener resultados más acertados. Para la etapa de homogenización se someten los datos a una función de transformación que ayudará a entenderlos de mejor manera.

Para homogenizarlos se inicia asignando un puntaje de 100 a los máximos valores de cada criterio y de cero a los mínimos, de la siguiente manera (tabla 11)

Tabla 11. Identificación de máximos y mínimos

Criterio	Máx.	Min
Disponibilidad anual del residuo (T/año)	4.982.192	559.006
Generación de biogás (m3/T)	514	352
Efectos ambientales y sanitarios	1	0
Área de influencia	3	3
Potencial uso de la red como biogás	2	2
Disponibilidad de biomasa para su aprovechamiento	3	1
Asignación	100	0

Una vez se tienen los máximos y mínimos identificados, se procede a interpolar los valores, asumiendo una función lineal para así calcular la pendiente de la transformación, obteniendo como resultado los valores mencionados en la tabla 12.

Tabla 12. Pendientes de las curvas de funciones de transformación para cada criterio.

Criterio	Max
Disponibilidad anual del residuo (T/año)	2,26081E-05
Generación de biogás (m3/T)	0,617283951
Efectos ambientales y sanitarios	100
Área de influencia	3
Potencial uso de la red como biogás	2

Disponibilidad de biomasa para su aprovechamiento	50
---	----

Como tercer paso para la homogenización, se debe conocer la función de transformación, la cual será el nuevo valor con el que se trabajarán los criterios, haciendo uso de la siguiente ecuación.

$$Y_i = M_i(X_i - X_{i \min})$$

Ec. Función de transformación (1)

Este paso se realiza con la finalidad de contar con datos que se encuentran en un mismo orden, y a su vez permite la facilidad y mejor manejo de la matriz.

Tabla 13. Valores de criterios homogenizados

Criterio	Arroz	Maíz	Palma de aceite
Disponibilidad anual del residuo (T/año)	17,92612836	0	100
Generación de biogás (m3/T)	0	100	100
Efectos ambientales y sanitarios	100	0	100
Área de influencia	0	0	0
Potencial uso de la red como biogás	0	0	0
Disponibilidad de biomasa para su aprovechamiento	0	0	100

5.1.2.5 Porcentaje de importancia. Una vez completada la etapa de homogenización en la que se tienen rangos de datos más fáciles de manejar, se debe establecer la importancia de cada uno de los criterios, el rango de importancia se establece en porcentajes teniendo en cuenta la experiencia de profesionales en

el tema, la asignación de importancia para cada criterio se presenta en la tabla 14 y son basados en los establecidos en el documento “Estimación del potencial de conversión de la biomasa en Colombia y su aprovechamiento” sin embargo, se debe recalcar que estos se modificaron de acuerdo con los objetivos del proyecto.

Para finalizar el proceso de la matriz y seleccionar la biomasa que más se acerca a las expectativas, se aplican las ponderaciones a los valores de los criterios, y se suman todos los criterios para cada biomasa y así conocer el índice de importancia, tal como lo muestra la tabla 14.

Tabla 14. Asignación de porcentaje de importancia para cada criterio

Criterio	% de importancia
Disponibilidad anual del residuo (T/año)	30
Generación de biogás (m3/T)	30
Efectos ambientales y sanitarios	20
Área de influencia	5
Potencial uso de la red como biogás	5
Disponibilidad de biomasa para su aprovechamiento	10

Tabla 15. Valores de los criterios ponderados.

Criterio	Arroz	Maíz	Palma de aceite
Disponibilidad anual del residuo (T/año)	5,377838508	0	30
Generación de biogás (m3/T)	0	30	30
Efectos ambientales y sanitarios	20	0	20
Área de influencia	0	0	0
Potencial uso de la red como biogás	0	0	0
Disponibilidad de biomasa para su aprovechamiento	0	0	10
Índice de importancia (Σ)	25,37783851	30	90

Como se evidenció gracias al índice de importancia, la biomasa que cumple con la mayoría de los requerimientos es la Palma de aceite, esta a su vez se desarrolla a manera de industria en gran medida en los departamentos de Santander, meta y Casanare, lo que la convierte candidato perfecto para proponer como biomasa para la obtención de biogás a través del proceso de conversión que mejor se adecúe a ella; las generalidades de la palma de aceite, así como su proceso de conversión se detallarán en el siguiente capítulo.

5.2 CONVERSIÓN DE LA BIOMASA A TRAVÉS DEL SISTEMA BIODIGESTOR

En la etapa de biodigestión se aprovechan los componentes de la materia orgánica en cuestión, los cuales serán descritos en el siguiente capítulo, de igual manera la configuración del reactor a emplear deberá cumplir con las exigencias de la biomasa para una reacción exitosa.

Un biodigestor básicamente consta de un recipiente de gran capacidad que se encuentra completamente cerrado, sin importar su tamaño o material; es importante seleccionar el biodigestor que más convenga de acuerdo con la materia orgánica con el cual se está trabajando, pues el biodigestor las almacena generando una mezcla con agua que, al descomponerse en ausencia de aire, produce biogás. [49]

Debido a que el POME es una materia de composición lignocelulósica, se tiene la posibilidad de emplear diferentes configuraciones de biorreactores para su conversión, en el artículo ***“Recent advances on palm oil mill effluent (POME) pretreatment and anaerobic reactor for sustainable biogas production”*** los autores realizan una revisión que establecen en la tabla 16 acerca de la disponibilidad de biorreactores para la transformación de POME en biogás, en la que se enuncian su ventajas y desventajas.

Tabla 16. Disponibilidad de biorreactores para transformación del POME

Biorreactor	Ventajas	Desventajas
De una sola fase	Costos reducidos, poco mantenimiento, simple manejo	Bajo OLR, Toma más tiempo de retención, no es económicamente factible, probabilidad de explosión, no controla PH, acumulación de inhibidores como VFA y componentes tóxicos.
Reactor multietapas	Recomendado para residuos orgánicos con alto contenido de lípidos, como el POME, incrementa la estabilidad del proceso de DA separando la etapa de acidogénesis y metanogénesis, brinda un proceso de optimización para cada grupo microbiano, poco tiempo de retención, incrementa la DQO.	El hidrógeno inhibe la acumulación de bacterias acidogénicas, eliminación de nutrientes requeridos por bacterias metanogénicas, mantenimiento complejo, altos costos de inversión y operación, requiere de técnicos para operar el sistema.
De membrana anaeróbica	Bajo consumo, requiere poco espacio para su funcionamiento, remueve eficientemente contaminantes, no afecta las propiedades de granulación.	La membrana es propensa a ensuciarse, requiere largo tiempo de retención de sólidos, requiere un protocolo estricto de limpieza, la membrana tiene poca vida útil, requiere alta presión.
Tanque agitado continuo	De operación sencilla, proporciona un buen contacto entre las aguas residuales y los microorganismos a través de la mezcla, menor costo de operación y mantenimiento, adecuado para aguas residuales con alto contenido de sólidos, preferible para escala industrial de tratamiento POME.	Tasas de reacciones metanogénicas lentas a OLR elevados, lavado de biomasa activa que crece en suspensión a TRH corta, la mezcla intensiva conduce a inestabilidades en el proceso y esfuerzo cortante inducido Corrosión de tanques de acero
De lecho de lodos granulares expandidos	Proporcionar suficiente unión entre la biomasa y el lodo, adecuado para tratamientos de contaminantes solubles, especialmente aguas residuales de baja resistencia, la eliminación de sólidos en suspensión es directamente proporcional a la velocidad del flujo ascendente.	Requiere una bomba de recirculación y aumenta el consumo de energía, menor adaptabilidad a la carga de choque, menor tasa de eliminación de materia orgánica por debajo del 70 -75%, formación de escoria y bloqueo de tubería.
Filtración anaeróbica de flujo ascendente	Retener microorganismos más densos en el reactor, capaz de capturar biogás en el reactor TRH corta.	Obstrucción a alto OLR debido a la formación de sólidos en suspensión en el POME, se requiere la adición de tampón a OLR alto para evitar la acumulación excesiva de ácidos libres.
De manto de lodo anaeróbico de flujo ascendente	Requiere menos volumen y espacio del reactor, permite que se produzca la separación sólido-líquido-gas en un solo reactor, proporcione suficiente adherencia entre las aguas residuales y el lodo, incluso con un OLR bajo < HRT corto Mayor estabilidad operativa.	Depende en gran medida de la sedimentabilidad del lodo, toma un período de inicio más largo, lavado de biomasa activa durante la fase inicial del proceso, espumación y flotación de lodos a alto OLR

Fuente: Recent advances on palm oil mill effluent (POME) pretreatment and anaerobic reactor for sustainable biogas production. Modificada

Para el proceso de obtención del biogás, existen consideraciones que no dependen del tipo de digestor que se emplee, y que garantizan su eficiencia, algunas son:

- *Caracterización la biomasa a emplear.*
- *Características hidrodinámicas del reactor.*
- *Condiciones ambientales para el funcionamiento del reactor (T, P, pH)*
- *Caracterización la biomasa a emplear.*

- *Características hidrodinámicas del reactor.*
- *Condiciones ambientales para el funcionamiento del reactor (T, P, pH)*
- *Producción estimada.*
- *Volumen del fermentador requerido.*

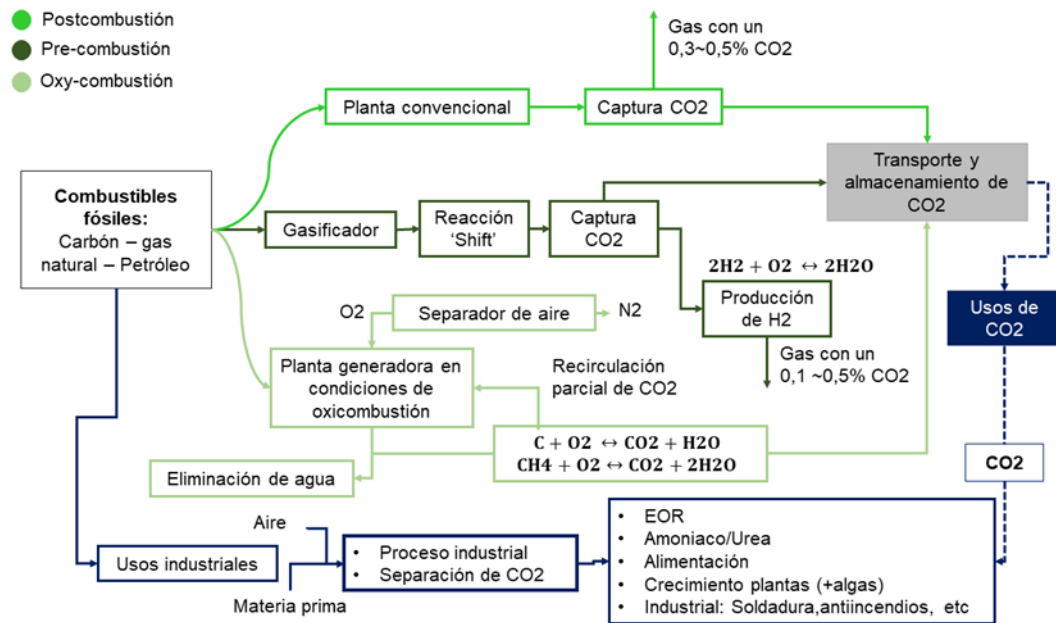
5.3 SEPARACIÓN Y CAPTURA

La etapa de separación de los componentes del biogás no es ajena a la configuración del biodigestor, pues una vez se capturan los gases en la bóveda de recolección que se encuentra en la parte superior, inicia la separación de estos. Ahora bien, luego de que se encuentran en este punto, existen diversos procesos para capturar el CO₂ (tabla 17), que dependen de factores como la procedencia del gas, las instalaciones, recursos con las que se cuenta, y por supuesto el avance tecnológico, es decir la selección del método a emplear depende en gran medida de la conveniencia del proyecto, en la tabla 17 se describen los principales métodos de captura de CO₂, y de forma complementaria, la figura 28 representa el flujo de cada uno de los procesos.

Tabla 17. Principales sistemas de captura de CO₂

Sistemas de captura de CO ₂	Ventajas	Desventajas	Referencia
Post- combustión	Se puede aplicar el sistema a un gas producto de la combustión de cualquier combustible. Eficiente separación del metano	Baja presión parcial de CO ₂ . Bajo porcentaje de captura de CO ₂ . Requiere de solventes para una captura efectiva de CO ₂ .	Captura de CO ₂ en procesos postcombustión: Overview, L. M. Romeo I. Bolea
Pre- combustión	Corrientes con altas concentraciones de CO ₂ . Altas presiones parciales de CO ₂ . Bajas temperaturas Se obtiene combustible rico en hidrógeno.	Requiere de un solvente para la eficiencia del proceso.	Evaluación de la captura de CO ₂ para la mejora del biogás mediante un cultivo de la microalga <i>Chlorella vulgaris</i> en un sistema de biorreactores a nivel de laboratorio, Briggitt Banessa Torres Gomez, Francy Natalia Cerón López
Oxi- combustión	Facilidad de purificación del CO ₂ remanente. Bajos costos del proceso de purificación.	Requiere oxígeno de alta pureza. No es compatible con todos los tipos gases. Temperaturas elevadas.	Captura de CO ₂ en centrales termoeléctricas mediante combustión de carbón y biomasa en condiciones de oxicomustión, Rianza Benito, Juan

Figura 28. Flujo de principales sistemas de captura de CO₂



5.4 TRANSPORTE

Antes de mencionar las aplicaciones del biogás, se hace necesario incluir dentro de los aspectos técnicos, el transporte, ya que independientemente del gas que sea de conveniencia para el proyecto en cuestión (biometano o CO₂) resultaría ideal la situación en que la locación de aplicación este ubicada en el lugar de tratamiento y captación, en este sentido, existen tres tecnologías empleadas para el transporte de los gases en cuestión.

La conducción mediante tuberías se considera el medio más eficiente en cuanto al biometano, debido a que, al poseer propiedades similares al gas natural, facilita el aprovechamiento de líneas instaladas en el país, lo que a su vez permite un transporte dinámico y continuo desde el lugar de captura a destino de aplicación. Con respecto al CO₂ se deben tener en cuenta costos de extra-compresión, pues debido a las pérdidas de cargas en la conducción deben existir estaciones de bombeo con distancias dentro de 200 km.

Existen dos tecnologías, que según la literatura se podría decir que compiten en costos, el transporte terrestre es la opción con mayor disponibilidad inmediata, pues existen en el mercado un gran número de vehículos dedicados a la actividad, sin embargo, no permite un proceso continuo y con grandes volúmenes, para este caso se debe disponer los gases en estado líquido, el cual se almacena en recipientes con capacidades desde 5 toneladas aproximadamente.

Con respecto a el transporte marítimo es aquel que conlleva a una relación de costo-volúmenes más conveniente, al igual que la tecnología terrestre, este se transporta como gases licuados, con presiones para el CO₂ de 0,7 MPa.

6. APLICACIÓN DE LA BIOMASA RESIDUAL EN LA INDUSTRIA DEL PETRÓLEO: CASO JUGUETE

En el último apartado del capítulo uno se abordó el cuarto elemento correspondiente a la fórmula para un sistema bioenergético en el que se considera el uso y la aplicación del producto resultante de un proceso de conversión de biomasa, de tal transformación se pueden obtener biocombustibles³¹, la naturaleza del biocombustible está en función de la materia prima que se empleó para su generación, así como el método de transformación. En el tercer capítulo se evidenció el desarrollo de una matriz de selección, que permitió conocer que la candidata más adecuada es biomasa residual de Palma de aceite, a partir de la evaluación de diversos criterios que encierran aspectos considerados como importantes para un proyecto bioenergético.

En este sentido, en el presente capítulo se desarrolla lo que se denomina en investigación un “caso juguete”, es decir, la representación de una pequeña situación en la que se demuestra la aplicación de los aspectos mencionados en los capítulos anteriores, que en conjunto conforman un análisis técnico del proceso.

Este caso se conforma de dos partes principales, por un lado, los procesos concernientes a la biomasa relacionado con la industria palmera, y por otro lado el proceso de su aplicación, que guarda estrecha relación con la industria del petróleo. Estas partes se conjugan como la búsqueda de una alternativa de aprovechamiento para los subproductos de palma de aceite de una planta de beneficio en Colombia, como biomasa residual en un proceso de la industria petrolera, se analizará por nodos estratégicos la conversión de la palma de aceite, y a su vez la captura y transporte del biogás obtenido, con la intención de ser inyectado en un proceso de

³¹ Combustible obtenido a partir del tratamiento de biomasa vegetal que es mucho menos contaminante que los combustibles de origen fósil.

inyección de gas para la recuperación de hidrocarburo³², es importante mencionar que el propósito no es sustituir en su totalidad el CO₂ convencional inyectado para la recuperación, pero si determinar si existe en el biogás una alternativa que soporte las cantidades de gas necesarias para el recobro.

6.1 CONTEXTUALIZACIÓN DEL PILOTO DE INYECCIÓN DE CO₂

La inquietud por las reservas de crudo, y los impactos ambientales son dos de los comentarios que rodean a la industria del petróleo, con respecto al primer aspecto se vienen desarrollando hace muchos años diversas tecnologías que ayudan a aumentar la recuperación de crudo, desde procesos mecánicos, hasta aquellos que involucran químicos o sustancias ajenas al subsuelo, una de ellas es la inyección de CO₂, pero ¿por qué CO₂? Pues se ha demostrado de manera experimental que el CO₂ y el petróleo siguen las normas de las soluciones cuando se tiene un sistema de CO₂ gaseoso y petróleo líquido, el CO₂ se disuelve el crudo, generando una reducción en la viscosidad, al darse dicho acontecimiento, aumenta la relación de movilidad del aceite en el yacimiento, y a su vez incrementa el recobro.

Sin embargo, la intención de este apartado no se enfoca en la recuperación del crudo, sino más bien en el segundo aspecto. En la medida que los intereses a nivel mundial experimenten un cambio positivo, la industria del petróleo también lo debe hacer, y la transición energética es un fenómeno de la actualidad del cual no se está exento, si no por el contrario, brinda la oportunidad de agregar valor. La propuesta la incursión de energías renovables aplicadas en la industria no tienen la intención de sustituir el hidrocarburo, en lugar de eso, agregarlo a sus procesos con el fin de hacerlos más sostenibles, por esta razón en la presente propuesta de aplicación no se busca el análisis de una sustitución completa del CO₂, pero sí analizar la

³² Compuesto químico formado por carbono e hidrógeno.

viabilidad de emplearlo como volúmenes de soporte, entregándolo en cabeza de pozo, y manteniendo la técnica de recobro tradicional.

Es importante aclarar, que, para este apartado, así como el tratamiento de análisis técnico, se manejará el sistema de unidades de campo, con el fin de generar datos sincronizados con la academia de la industria O&G. Los datos del campo estudio se han tomado de la tesis “Evaluación económica del piloto de inyección cíclica de CO₂ del campo Llanito de la gerencia regional de la magdalena medio” en la que se desarrolla el piloto de CO₂ cíclica, sus generalidades y resultados.

El campo de referencia se encuentra en Santander, al Norte de Barrancabermeja en el Valle Medio del Magdalena. Su extracción se caracteriza por ser de tipo primario con empuje de agua y gas en solución como mecanismo de producción, lo que lo convierte en el perfecto candidato para la inyección de CO₂.

Con el objetivo de contextualizar el caso base, la figura 29 presenta el resumen de la vida productiva del campo estudio en el que se llevaron a cabo procesos que estuvieron encaminados a la extracción de la mayor cantidad de aceite.

Por otro lado, la tabla 18 explicita los valores de cada una de las propiedades físicas de la roca y de los fluidos del campo, y, de acuerdo con ello se determinó que la inyección de CO₂ debe ser un proceso inmisible, ya que por límites de presión de fractura no se podría alcanzar la presión mínima de miscibilidad.

Figura 29. Historia de producción del campo estudio

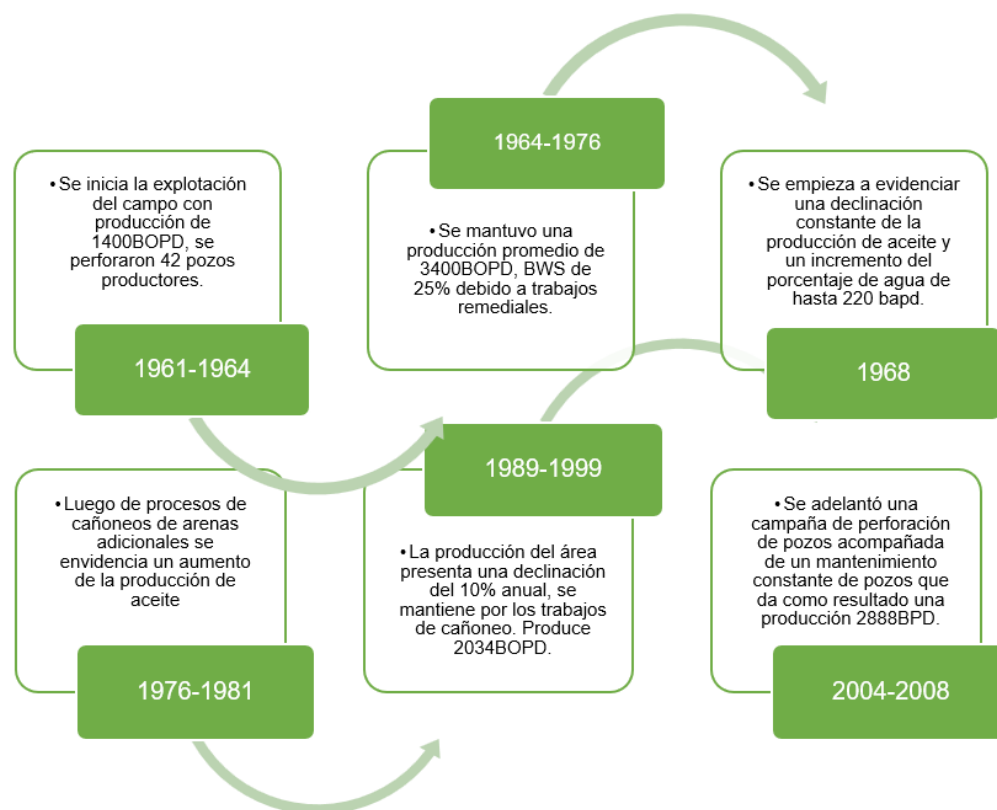


Tabla 18. Propiedades del yacimiento del campo estudio

Propiedades de la roca y fluidos del campo	Rango
Presión de saturación (120°F) PSI	1952
Gravedad API del aceite (60°F) °API	19,8
Viscosidad del crudo (P atm) cp.	70,3
Relación GAS-ACEITE Original. FT3/BL	122
Factor Volumétrico de Formación Original, BL/BF	1096

Para desarrollar el piloto de inyección de CO₂ se seleccionó un pozo basado en varios factores, tales como: el bajo corte de agua que posee, su alto potencial de

producción, la arena productora perteneciente a la formación mugrosa, las buenas condiciones del estado mecánico y su infraestructura civil, que hacían más viable la inyección de CO₂.

Tabla 19. Consideraciones para el piloto de inyección de CO₂

Parámetros de inyección	
Presión Máxima de Inyección, psi	1500
Solubilidad, ft ³ /Bbl	300
Compresibilidad del CO ₂	0,275
Peso Molecular Promedio del CO ₂	41,52
Gravedad Específica del CO ₂	1,4332207

La anterior tabla muestra los parámetros que debieron tenerse presentes para la inyección del CO₂ en el pozo. De acuerdo con los cálculos de volúmenes de inyección que se establecieron para el piloto de inyección de CO₂, se pensó en inundar el 10% del volumen poroso, que a condiciones de yacimiento sería igual a **1'844.846 ft³**.

Tabla 20. Consideraciones para el piloto de inyección de CO₂

VOLÚMENES DE INYECCIÓN	
Re, ft	107
Espesor, ft	40
Porosidad, %	0,24
Volumen Poroso Total, ft ³	345293,71
Volumen por afectar, %	10
Volumen poroso por afectar a condiciones de yacimiento, Ft ³	34529,37
Volumen poroso por afectar a condiciones de yacimiento, bbl	6149,49

6.2 CARACTERÍSTICAS DE LA PALMA DE ACEITE COMO BIOMASA RESIDUAL

Con su origen en el continente africano La palma aceitera se cultiva en diferentes partes del mundo generalmente en zonas tropicales, con altos niveles de biodiversidad, y requiere altas temperaturas durante todo el año y agua constante en parámetros alrededor de una precipitación entre 2000 y 2500 mm al año, sin épocas secas que duren más de 90 días, y una baja altitud.³³

La configuración natural de la palma de aceite permite que sea utilizada en una gran variedad de campos, de los cuales se ha presentado evidencia investigativa del aprovechamiento del tronco, hojas y frutos de esta. El tronco y hojas se emplean como material para la construcción de muebles y pulpa de papel, mientras que del fruto se obtienen los conocidos aceites de palmiste y palma que tienen su uso en la cotidianidad para la elaboración de alimentos entre otros químicos; sin embargo, aunque sea el producto predominante, solo corresponde al 10% de la utilización del árbol de palma. (subproductos de la palma de aceite como materias primas de la biomasa).³⁴

Debido a que el tipo de biomasa que se seleccionó es de carácter residual, esta sección se enfocará en el detalle de los subproductos del proceso de extracción del aceite de palma, como son los racimos de fruto vacíos o raquis (RFV), la fibra mesocarpio (MF), cuesco y efluentes de palma de aceite (POME) generados durante las actividades que conforman la operación de extracción como plantación, poda y trituración, que actualmente representa una desventaja en la industria, pues se torna complejo el proceso de disposición debido a los grandes volúmenes

³³ Nogués, Fernando Sebastián. Energía de la Biomasa (volumen I). Universidad de Zaragoza, 2010.

³⁴ Observatorio De costes del transporte de mercancías por carretera [Anónimo]. Portada | Ministerio de Transportes, Movilidad y Agenda Urbana [página web].

manejados, al punto en que en algunos casos se espera su descomposición en los campos productivos.

Si lo que se busca es obtener biogás, la biomasa que se emplee debe estar constituida fundamentalmente por componentes como carbohidratos, proteínas, grasas, celulosa y hemicelulosa, pues son estos los que al someterse a un proceso de conversión generan gas con propiedades aprovechables.

“El Palm Oil Mill Effluent” o POME es un subproducto de la palma de aceite, en su mayoría líquido, rico en los compuestos que se mencionaron anteriormente, se considera uno de los sustratos más apropiados para la obtención de biogás, sin dejar a un lado su potencial uso para la obtención de biodiesel, biobutanol, biohidrógeno o polímeros. El uso de este subproducto como biomasa se ha popularizado dentro del gremio de la investigación en los últimos años, ya que además de sus propiedades composicionales, actualmente presenta dificultad de disposición por sus grandes volúmenes, que resultan de los efluentes de tres áreas del proceso de extracción: aguas de la clarificación, aguas del condensado esterilizado, y el flujo residual del hidrociclón, la literatura indica que se emplean hasta 1,5 m³ de agua por cada tonelada de racimo de fruta fresca procesado (RFFP), del cual se produce POME en una relación aproximada del 50%.

La apariencia física del POME es la de un fluido ácido, espeso, coloidal y viscoso, con altos contenidos de sólidos totales (4 – 5%) y volátiles (2 – 4%), así como grasas (0,6 – 0,7%), que se descarga a temperaturas de 50 a 90 °C, contiene una cantidad importante de aminoácidos , compuestos nitrogenados, nutrientes inorgánicos , fibras cortas, ácidos orgánicos libres y carbohidratos, estos últimos de la ruptura de las celulosas y hemicelulosas en la extracción al vapor.³⁵

³⁵ Observatorio De costos del transporte de mercancías por carretera [Anónimo]. Portada | Ministerio de Transportes, Movilidad y Agenda Urbana [página web].

Con la finalidad de conocer de manera detallada la composición del POME, para de esta manera facilitar la predicción del biogás que podría resultar de su conversión, se desarrolla la siguiente tabla que muestra a detalle las propiedades físicas y químicas del POME, así como sus concentraciones (Tabla 21)

Tabla 21. Propiedades físicas y químicas del POME

Parámetro	Unidad	Rango de concentración
Demanda química de oxígeno	mg/L	15000 - 100000
Demanda bioquímica de oxígeno	mg/L	10250 - 43 750
Sólidos totales	mg/L	11500- 79000
Total sólidos suspendidos	mg/L	5000 - 54000
Total sólidos volátiles	mg/L	9000 72000
Nitrógeno totales	mg/L	180 - 1400
Aceite y grasa	mg/L	130 - 18000
Temperatura	°C	80 - 90
PH		3.4 - 5.2
Lignina	ppm	4700
Fenoles	ppm	5800
Pectinas	ppm	3400
Caroteno	ppm	8
Cadmio	mg/L	0,01 - 0,02
Calcio	mg/L	276- 405
Cromo	mg/L	0,05 - 0,43
Cobre	mg/L	0,8 - 1,6
Cobalto	mg/L	0,04 - 0,06
Hierro	mg/L	75 - 164
Magnesio	mg/L	254 - 344
Manganeso	mg/L	2,1 - 4,4
Fósforo	mg/L	94 - 131
Potasio	mg/L	1281 - 1928
Zinc	mg/L	1,2 - 1,8

Fuente: Ahmad A, Ghufuran R, Wahid ZA, 2015

6.3 GENERALIDADES DE LA PLANTA DE BENEFICIO

Colombia es líder en producción de palma de aceite en Latinoamérica, y ocupa el cuarto lugar a nivel mundial con 7.882.225 Toneladas de RFFP (racimos de fruta fresca procesada) por año, para el caso juguete se tomó como referencia una planta de beneficio ubicada en el departamento de Santander, teniendo en cuenta que es la región en la que se encuentra el campo en el que se empleará el proceso de recobro.

El departamento de Santander aporta el 14,25% de RFF procesada al país, y lo conforman 8 plantas de beneficio, es decir, en promedio en una planta ubicada en la región se procesan 140.303 Ton RFF por año, según datos de Fedepalma el procesamiento de una tonelada de RFF tiene un factor de generación de POME del 0,6m³, haciendo que con un promedio de trabajo de 20 horas al día, se procesen 20 toneladas de RFF por hora, sumado a esto, basado en datos experimentales plasmados en la revista Fedepalma se tiene que en promedio el factor de generación de biogás es 8m³ por un m³ de Pome.

6.4 SELECCIÓN DEL SISTEMA DE BIORREACTOR A EMPLEAR³⁰

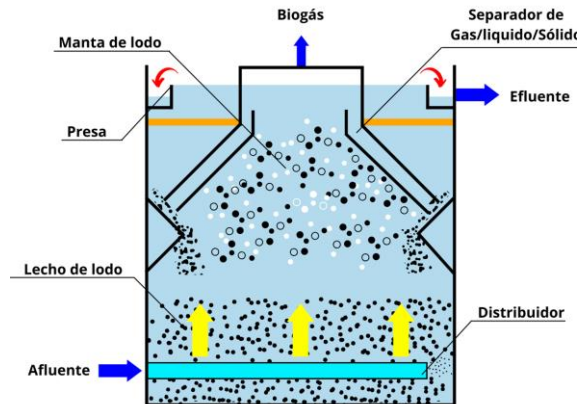
De acuerdo con la revisión estipulada en la tabla 16, para determinar el biorreactor que mejor se ajusta a las condiciones reales en las que se encontraría el proyecto, se seleccionó el ***reactor con manto de lodo anaeróbico de flujo ascendente (UASB, por sus siglas en inglés)*** este reactor lo componen gránulos microbianos de un rango entre 1 a 3mm de diámetro, es decir, se generan pequeños cúmulos de microorganismos, que se resisten a ser arrastrados por el flujo que va ascendiendo, los microorganismos que se quedan en la capa de lodo actúan como torniquete y degradan los compuestos orgánicos que pasan por ellos, es ahí donde se generan gases de metano y dióxido de carbono, mientras tanto, las burbujas que van suben ayudan a mezclar el lodo, y de esta manera no se requiere de una herramienta mecánica para realizar esta actividad.³⁶

En la figura 30 se muestra un piloto de UASB donde se evidencia su estructura con paredes inclinadas que ayudan a desviar hacia el fondo el material que se posa en la parte superior del tanque. El efluente que se ha limpiado se extrae de la parte superior del tanque. Luego de algunas semanas de uso inicia la formación de gránulos de lodo que hacen las veces de sistema de filtración para captar las

³⁶ Colombia, Congreso de la República, ley 1715 de 2014, Disponible en: <https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma.php?i=57353>

partículas más pequeñas a medida que el efluente va subiendo por las almohadillas del lodo.³⁷

Figura 30. Esquema básico de un biorreactor tipo UASB.



Fuente: Tomada y modificada de <https://rpubs.com/rociolandromora/662099>

Una de las ventajas principales del UASB en cuanto a conversión del POME se refiere, es su permisibilidad para el tratamiento de materia con alto contenido de compuestos orgánicos como lo es el POME, un tiempo de retención hidráulico corto y proporciona una baja demanda de energía, lo que permite que el proyecto sea más viable económicamente, sumado a la posibilidad de generación de hidrógeno para aprovechamiento energético.³⁸

La eficiencia del reactor UASB en la remoción de DQO total y de sólidos suspendidos totales de las aguas residuales, está condicionada por la VCO

³⁷ Hafner, S. D., Koch, K., Carrere, H., Astals, S., Weinrich, S., & Rennuit, C. (2018). Software for biogas research: Tools for measurement and prediction of methane production. *SoftwareX*, 7, 205–210. <https://doi.org/10.1016/J.SOFTX.2018.06.005>).

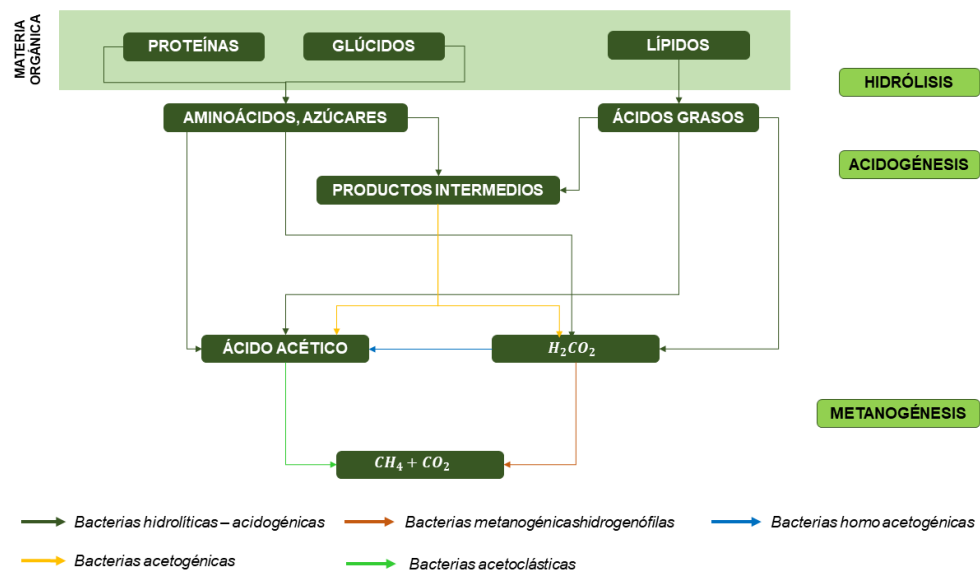
³⁸ Perfetti, Juan José, et al. Políticas para el desarrollo de la agricultura en Colombia [en línea]. LIB_2013_Políticas para el desarrollo de la agricultura_Completo.pdf, Bogotá, Colombia. Abril, 2013. Disponible en Internet: <https://www.repository.fedesarrollo.org.co/bitstream/handle/11445/61/LIB_2013_Políticas%20para%20el%20desarrollo%20de%20la%20agricultura_Completo.pdf?sequence=1&isAllowed=y>.

(velocidad de carga orgánica) y el TRH aplicados, así como por la concentración de sólidos suspendidos totales en el influente³⁹

La cantidad de biogás que se genera en un biorreactor UASB depende en gran medida de la eficiencia de los procesos a lo largo de la digestión anaeróbica, en la figura 31 podemos observar los procesos por los que pasa la materia orgánica para la producción de biogás. Una baja cantidad de biogás no solo se debe a la cantidad de MO sino también a ciertos factores:

- *Producción de biogás limitada por baja hidrólisis.*
- *Baja concentración de DQO_s biodegradable y/o DQO₅₅ en el influente.*
- *Operación del biorreactor a temperaturas bajas y variables.*

Figura 31. Fases de la fermentación anaerobia. Modificada



³⁹ Secretaría de Energía (Argentina), Energías Renovables 2008 - Energía Biomasa

6.5 ESTIMACIÓN DEL BIOGÁS A PARTIR DEL POME

En esta sesión se desarrolla el tratamiento de datos para conocer la producción de biogás que podría generar la planta de beneficio seleccionada, en las tablas 22, 23, 24 se presenta información de producción de la planta de beneficio, tiempos de retención hidráulicos recomendados y principales parámetros de diseño para el biorreactor, respectivamente.

Tabla 22. Datos de producción de la planta de beneficio

Descripción	Unidades	Valor
Cantidad de fruto porcesado por año	Ton de RFF/a	140000
Cantidad de fruto porcesado al día	Ton RRF/d	240
Horas de trabajo de la planta al día	hrs	20
Factor de generación de POME	m3 POME /Ton RFFP	0,6

Tabla 23. Tiempos de retención hidráulico recomendados

Temperatura de tratamiento (°C)	Tiempo de retención hidráulico (hr)	
	Promedio diario	Mínimo
16 a 19	>10 a 14	>7 a 9
20 a 26	>6 a 9	>4 a 6
>26	>6	>4

Tabla 24. Parámetros para uso del biorreactor UASB

Parámetro	Unidad	Rango
Carga volumétrica	m3/m3-d	>4
TRH	hr	6 a 9
Velocidad de ascenso	m/hr	0.5 a 0.7

Se da inicio al tratamiento de datos con los valores promedio y máximo de la producción de POME por día y hora, teniendo en cuenta que el valor de generación es 0,6 m³ por cada Tn de RFF, y se tiene un promedio de 20 Tn RFF/ h.

$$Q_{prom} = \frac{12m^3}{h} \cdot \frac{20 h}{d} = \frac{240 m^3}{d}$$

$$Q_{m\acute{a}x} = \frac{12m^3}{h} \cdot \frac{24 h}{d} = \frac{288 m^3}{d}$$

La DQO (Demanda química de oxígeno) y DBO (Demanda biológica de oxígeno) del POME producto de la planta en cuestión, son las siguientes, de igual manera la temperatura de tratamiento del biorreactor se indica y fracción de lodo.

$$DQO = 20.000 \text{ mg/L}$$

$$DBO = 15.000$$

$$T^{\circ} = 28^{\circ}C$$

$$\% \text{ Lodo en descarga} = 4\%$$

$$\rho_{lodo} = 10,20 \text{ kg/m}^3$$

Se cuenta con factores de rendimiento que se encuentran en la literatura pertenecientes al biorreactor UASB

$$\text{Rendimientos, } Y = 0,18 \text{ kg TSS/kg DQO}$$

Rendimiento en términos de DQO $Y_{obs} = 0,25 \text{ kg DQO/kg DQO}$

1. *Cálculo de la carga orgánica del afluente (L_o)*

- $L_o = S_o * Q_{av} = 10 \text{ kg/m}^3 * 240 \text{ m}^3/d$
- $L_o = 2400 \text{ kg/d}$

2. *Se establece un THR de 8h según tablas.*

3. *Se calcula el Volumen del reactor*

- $v = Q_{av} * THR = \frac{12m^3}{h} * 8h$
- $v = 96 \text{ m}^3$

4. *Establecer número de módulos:*

- $N = 1$

5. *Se establece la h del reactor: 4,5 m por experiencia plasmada en la literatura.*

6. *Área de módulos:*

- $A = \frac{96 \text{ m}^3}{4,5 \text{ m}} = 21,33 \text{ m}^2$

7. *Se emplearán reactores rectangulares por facilidades de construcción.*

- *Ancho 4,3 × Alto 5 [m]*

8. *Corrección de medidas:*

- $A = 21,33 \text{ m}^2$
- $V_t = 21,33 \text{ m}^2 \times 4,5 = 95,98 \text{ m}^3$
- $\text{Corrección THR} = Vol_T / Q_{prom} = 8h$

9. *Verificación de carga volumétrica:*

$$VHL = \frac{Q}{V_t} = \frac{240 \text{ m}^3/d}{95,98}$$

$$VHL = \frac{240 \text{ m}^3}{\text{m}^3 d^{-1}}$$

10. Verificación de carga orgánica:

- $L_o = Q_{prom} * S_o = 20 \text{ DQO kg/m}^3 * 240 \text{ m}^3/d$
- $L_v = \frac{2400 \text{ m}^3}{95,98} = 25 \text{ kg} \frac{\text{DQO}}{\text{m}^3}$

11. Verificación de velocidad ascensional:

- $@Q_{prom} \rightarrow v = \frac{Q_{prom}}{A} = \frac{12 \text{ m}^3/h}{21,3 \text{ m}^3} = 0,5 \text{ m/h}$ (Cumple con los estándares)

12. Sistema de distribución del efluente:

- Se establece un área de distribución
- $A_d = 2,25 \text{ m}^2$
- $N_d = \frac{A}{A_d} = \frac{21}{2,25} = 10 \text{ tubos}$

13. Estimación de la eficiencia de remoción de la DQO:

- $EDQO = 100 \times (1 - 0,68 \text{THR}^{-0,35})$ (Ec. Experimental)
- $EDQO = 67\%$
- $EDQO = 100 \times (1 - 0,7 \text{THR}^{-0,5}) = 75\%$

14. Estimación de la DQO en el efluente:

- $C_{eff} = S_o - \frac{(E * S_o)}{100}$
- $C_{eff} = 20000 - \frac{(67 * 600)}{100}$
- $C_{eff} = 19598$

15. Cálculo de metano

- $DQO_{CH_4} = Q_{prom} * (S_o - C_{eff}) - Y_{obs} \times S_o$
- $DQO_{CH_4} = 210 \frac{m^3}{d} * \left[\left(20 - 0,198 \frac{kg DQO}{m^3} \right) \right] - \frac{0,21 \text{ kg } DQO}{Kg \text{ DQO}_{apli}} \times 20$
- $DQO_{CH_4} = 3744,48 \text{ kg } DQO/d$

16.

$$K_t = \frac{P \cdot K_{DQO}}{R \cdot (273 + T)} = \frac{1 \text{ atm} \cdot 64 g \frac{DQO}{mol}}{0,08206 * (273 + 28)} = 2,59 \frac{DQO}{m^3}$$

$$Q_{CH_4} = \frac{DQO_{CH_4}}{k_t} = \frac{3744,48}{2,59} = 1445 \frac{m^3}{d}$$

$$Q_{biogás} = \frac{Q_{metano}}{0,60} = 2408 \frac{m^3}{d}$$

$$Q_{CO_2} = \frac{Q_{metano}}{0,60} = 890 \frac{m^3}{d}$$

17. Dimensionamiento de los colectores:

$$No. Colectores = 10$$

$$Longitud = 4,3m$$

$$Longitud \times N = 43m$$

$$Ancho de parte superior = 0,25m \text{ (se asume)}$$

$$A_T \text{ Colector} = 43m \times 0,25m = 10,75m^2$$

18. Verificación de tasa de liberación del biogás.

$$kg = \frac{Q_{biogás}}{A_{tg}} = \frac{2408 m^3/d/24}{10,7} = 9,37 \frac{m^3}{m^2 \cdot h}$$

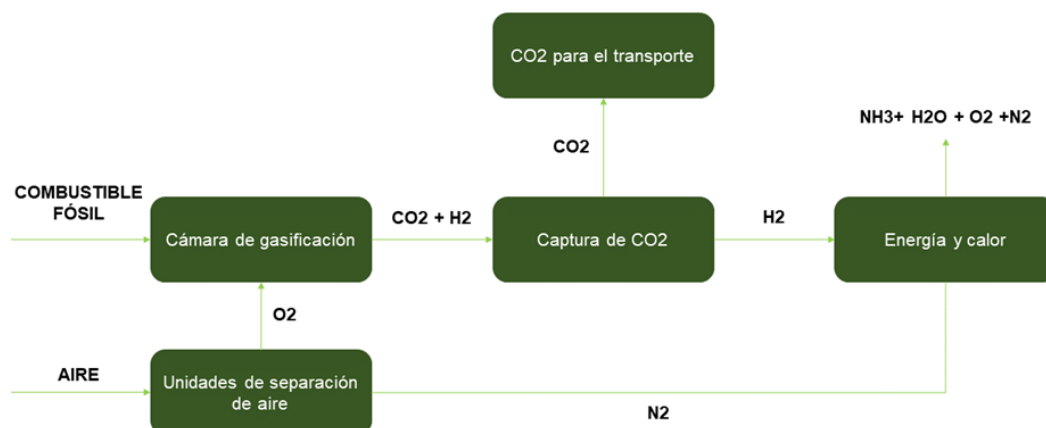
Según el tratamiento de datos, se tendrá una producción de biogás de $2408 \frac{m^3}{d}$, que se procesarán en un biorreactor UASB con 4,5 m de altura, y un área de 21.3 m, constará de 10 colectores que permitirán de manera individual una tasa de salida del biogás de $9,37 \frac{m^3}{m^2 \cdot h}$. El biorreactor tiene una eficiencia de remoción del 67%, sin embargo, gracias a su configuración, los sólidos que no se trataron podrán incluirse a la siguiente lechada de entrada.

6.6 SEPARACIÓN Y CAPTACIÓN DEL CO₂

Para el caso de aplicación que se está desarrollando, se precisa capturar el CO₂ como compuesto principal, ya que este sería el gas empleado para la inyección en el proceso de recuperación, sin embargo, el papel del metano en la aplicación no acaba, ya que al concluir el proyecto se planteará una propuesta de uso para el metano procedente del biogás, teniendo en cuenta su variedad de posibles aplicaciones.

El sistema escogido para el caso juguete captura de CO₂ por pre- combustión, en este sistema se captura el CO₂ sin haber sufrido un proceso de combustión, y aunque brinda una alta concentración de CO₂, permite incrementarla aún más a través de la reacción del biogás con vapor y oxígeno, que produce una mezcla en la que predomina el gas de síntesis. El monóxido, perteneciente al gas de síntesis, reacciona con el vapor al pasar por un reactor de conversión en el que se obtiene CO₂ y H₂, en última instancia, se remueve el CO₂ de la corriente empleando un proceso de absorción física o química y como segundo producto, se obtiene un combustible con alto porcentaje de hidrógeno, que se usa en diferentes áreas.

Figura 32. Esquema general del proceso de captura de CO₂ mediante técnicas de precombustión



El proceso general de captura de CO₂ en pre - combustión comprende las etapas mostradas en la tabla 25. El resultado de este proceso (ver figura 33) es un gas combustible compuesto principalmente por Hidrógeno y a su vez se obtiene CO₂ cuya impureza dependerá de las tecnologías que se utilizan en cada fase, la separación del CO₂ del H₂ se logra a través de membranas, técnicas de absorción y de adsorción.⁴⁰

Básicamente capturar CO₂ por precombustión implica los siguientes pasos respectivamente⁴¹

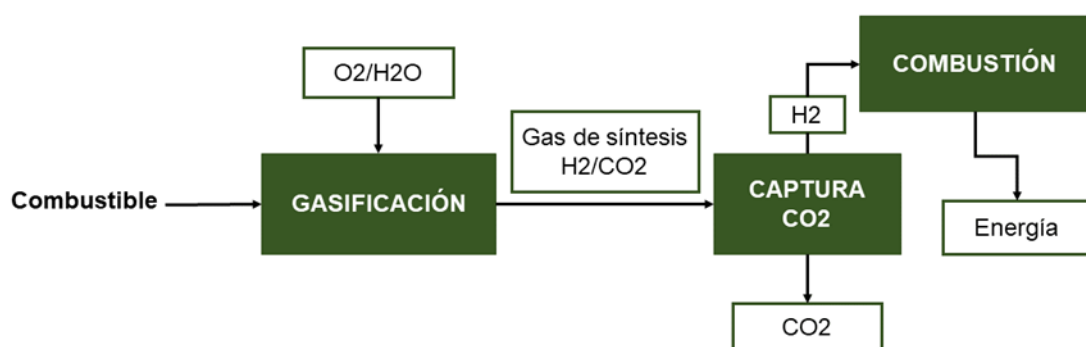
1. *Separación de oxígeno*
2. *Manejo del combustible (Lignito/biomasa)*
3. *Gasificación y reformado (Gas natural, carbón lignito y biomasa)*
4. *Eliminación del polvo*

⁴⁰ Región Administrativa y de Planeación Especial Rap-E Y – Universidad Distrital Francisco José De Caldas. Biomasa en la región central [en línea]. CptI06-BIOMASA-EN-LA-REGIÓN-CENTRAL.pdf, Caldas, Colombia. 2020. Disponible en Internet: <<https://regioncentralrape.gov.co/wp-content/uploads/2020/05/CptI06-BIOMASA-EN-LA-REGIÓN-CENTRAL.pdf>>

⁴¹ Saldívar Espareza, Santiago, et al. Tecnologías de captura y almacenamiento de dióxido de carbono. 2017.

5. Intercambio de CO
6. Desulfuración
7. Captura de CO₂/Separación de H₂
8. Turbina de gas H₂
9. Purificación de CO₂
10. Compresión del CO₂

Figura 33. Proceso esquemático de captura de CO₂.



Fuente: Santosa, Sri Juari. Palm oil boom in Indonesia: from plantation to downstream products and biodiesel. CLEAN–Soil, Air, Water, 2008, vol. 36, no 5-6, p. 453-465.

Cabe resaltar que los sistemas de captura de CO₂ están acondicionados para que el CO₂ capturado pueda ser comprimido para su posterior transporte y almacenamiento dependiendo de las necesidades del proyecto.⁴²

Para este proceso de captura y separación de CO₂, se buscó emplear una tecnología de las disponibles: adsorción, absorción, por membranas, destilación criogénica, formación de hidratos o CLC. Para fines de este proyecto, se seleccionó la absorción química ya que teniendo en cuenta la composición del biogás mayoritariamente por CH₄ y CO₂, los procesos de separación de esa mezcla

⁴² Santosa, Sri. (2008). Palm Oil Boom in Indonesia: From Plantation to Downstream Products and Biodiesel. CLEAN – Soil, Air, Water. 36. 453 - 465. 10.1002/clen.200800039.

incluyen la absorción química utilizada en muchas plantas a través de compuestos como aminas ⁴³

Añadiendo a eso que los análisis económicos orientados en esta tecnología resultan en procesos menos costoso e implican una mayor capacidad de procesamiento por capital que otras⁴⁴, presentando un alto rendimiento aún con bajas presiones.

Industrialmente, la absorción de CO₂ de una corriente de biogás se lleva a cabo mediante una mezcla de metildietanolamina y piperazina (MDEA). Esta tecnología consiste en un absorbedor que absorbe el CO₂ presente en el biogás y un lavador o stripper en el que se libera el CO₂ de la solución de amina, estas plantas procesan operativamente de 55 a 13.000 Nm³ h⁻¹⁴⁵. No obstante, la separación de la mezcla CH₄/CO₂ y la purificación del CO₂ puede llevarse a cabo a través de diferentes procesos para lograr obtener una mejor recuperación de este biogás como muchas investigaciones lo proponen, a continuación, se presentan los procesos que serían más eficientes para el objetivo que se tiene en la presente sección.

⁴³ Schallenberg Rodríguez, Julieta C., et al. Energías renovables y eficiencia energética. 2008.

⁴⁴ Secretaría de Energía (Argentina), Energías Renovables 2008 - Energía Biomasa

⁴⁵ Sridhar MKC, Adeoluwa OO. Palm oil industry residues. Biotechnology for agro-industrial residues utilization: Utilization of Agro-Residues. 2009. https://doi.org/10.1007/978-1-4020-9942-7_18.)

Tabla 25. Etapas de la pre - combustión

Etapas de la pre-combustión	Producción de un gas de síntesis.	Compuesto de CO y H ₂ por reacciones a altas temperatura y presiones entre el agua y el O ₂ o gas natural y vapor de agua (la presencia de metano reduce la captura de CO ₂).
	Acondicionamiento del gas sintético.	Por eliminación de cenizas, partículas, compuestos de azufre y otras impurezas.
	Conversión de CO a CO ₂ .	Por reacción Water-Gas-Shifting mediante la adición de vapor.
	Separación del CO ₂ e H ₂ del gas convertido.	Por absorción, la adsorción, membranas, y destilación criogénica.

Añadiendo a eso que los análisis económicos orientados en esta tecnología resultan en procesos menos costoso e implican una mayor capacidad de procesamiento por capital que otras⁴⁶, presentando un alto rendimiento aún con bajas presiones.

Industrialmente, la absorción de CO₂ de una corriente de biogás se lleva a cabo mediante una mezcla de metildietanolamina y piperazina (MDEA). Esta tecnología consiste en un absorbedor que absorbe el CO₂ presente en el biogás y un lavador o stripper en el que se libera el CO₂ de la solución de amina, estas plantas procesan operativamente de 55 a 13.000 Nm³ h⁻¹ [61]. No obstante, la separación de la

⁴⁶ Secretaría de Energía (Argentina), Energías Renovables 2008 - Energía Biomasa

mezcla CH₄/CO₂ y la purificación del CO₂ puede llevarse a cabo a través de diferentes procesos para lograr obtener una mejor recuperación de este biogás como muchas investigaciones lo proponen, a continuación, se presentan los procesos que serían más eficientes para el objetivo que se tiene en la presente sección.

Proceso 1: Eliminación de H₂S por absorción con aminas: El punto más alto de recuperación y pureza de CO₂, y la eliminación de H₂S, se obtuvo a 21 °C y 138 kPa, se tomaron 0,037 m³/min de MDEA del sistema principal de amina.

Proceso 2: Sistema de deshidratación con TEG: 149 y 204 °C, hasta alcanzar la concentración de TEG más alta en la torre de regeneración.

Proceso 3: Sistema criogénico Ryan Holmes: Para obtener la máxima recuperación de CO₂ en la parte inferior de la torre, se requirió una presión de 2758 kPa y una temperatura en el condensador de -40 °C.⁴⁷

La recuperación de CO₂ se calcula como se muestra en la ecuación 1, y se asume una recuperación de 99,85% por la combinación de los procesos 1 y 2 y la compresión del gas.

$$\text{Recuperación de CO}_2 = \frac{\text{Salida de CO}_2 \text{ (kmol/h)}}{\text{Entrada de CO}_2 \text{ (kmol/h)}} \quad \text{Ec. (1)}$$

Teniendo en cuenta lo anterior, la corriente de biogás saliente del biorreactor UASB fluye con un caudal de 1926 m³/día. En ese sentido y teniendo en cuenta los tres

⁴⁷ Tecnologías para el uso y transformación de biomasa energética, Mundi Prensa, Ediciones Parainfo, Madrid, España, 2015.

procesos por los cuales a traviesa el biogás obtenemos una recuperación que se muestra en la tabla 26.

$$\dot{m} = Q * \rho$$

$$\dot{m} = 1926 \text{ m}^3/\text{h} * 0,8 \text{ ton}/\text{m}^3$$

$$\dot{m} = 1540,8 \text{ ton}/\text{h} * \frac{1000 \text{ kg}}{1 \text{ ton}} * \frac{1 \text{ mol}}{44 \text{ g}} * \frac{1000 \text{ g}}{1 \text{ kg}} * \frac{1 \text{ kmol}}{1000 \text{ mol}} = 35018,1818 \text{ kmol}/\text{h}$$

$$\text{Salida de CO}_2 = 0,9985 * 35018,1818 \text{ kmol}/\text{h}$$

$$\text{Salida de CO}_2 = 34965,1818 \text{ kmol}/\text{h}$$

Tabla 26. Recuperación y salida de CO2

Proceso	Recuperación de CO2 (%) [64]	Salida de CO2 (kmol/h)
1. Eliminación de H2S por absorción con aminas	94,02	32924,0945
2. Deshidratación con TEG	99,74	34927,1345
3. Sistema criogénico Ryan Holmes	99,91	34986,6655
4. Combinación 1: procesos 1 y 2 + compresión	99,85	34965,1818

Los procesos 1 y 2 presentan flexibilidad moderada debido a que el control de las condiciones de operación es relativamente sencillo por la experiencia de la industria O&G en estos sistemas.

6.7 ALMACENAMIENTO Y TRANSPORTE DEL CO₂ OBTENIDO DEL BIOGÁS

Tal como se ha reflejado durante el desarrollo del proyecto, luego de la biodigestión del POME se cuenta con dos gases principales en volúmenes razonables tal que , que permiten su aprovechamiento en distintas industrias, para este caso en específico se demostrará su uso como alternativa de soporte en un proceso de inyección de CO₂ que se lleva a cabo en un campo dentro de la región de Santander, aproximadamente a 48 km de distancia de la planta de beneficio de Palma, en donde ocurre el proceso de captación de CO₂.

El CO₂ es un gas incoloro e inodoro que posee un peso 1,5 veces mayor al del aire, este se encuentra en la atmosfera con una concentración de 300ppm aproximadamente, su naturaleza inerte no lo hace exigente en cuanto a materiales de almacenamiento, sin embargo la presencia de humedad, sumado a las altas concentraciones hace que reaccione formando ácido carbónico, por esta razón es importante hablar de su almacenamiento, pues en este punto se entiende que parte del proceso de transporte conlleva a retener el CO₂ en tanques provisionales tras ser capturado y antes de transportarlo para su finalidad. Los parámetros de almacenamiento se tornan estrictos ya que, si la presión en esta etapa es muy baja, la temperatura del gas se acercaría a su punto de ebullición (-78,5°C y 5,24 bar) generando lo que se conoce coloquialmente como “hielo seco”. De acuerdo con lo mencionado, se recomienda la aplicación de la norma ASME (American Society of Mechanical Engineers, por sus siglas en inglés) que indican el almacenamiento del CO₂ en estado líquido se almacena en tanques de capacidades por encima de 1M3 y a presiones por encima de 100.000 Pa, con la finalidad de mantenerlo en estado líquido ya que en esta fase disminuye considerablemente su volumen.

Diariamente se tiene un flujo de CO₂ correspondiente a 890 m³/d que se almacenarán en estado líquido en un tanque criogénico típico, con una capacidad

de 30 M3 con una presión de trabajo de 2.2 MPa suficiente para contener aproximadamente 1 mes de producción de CO₂.

En cuanto al transporte, se seleccionó la tecnología de transporte terrestre teniendo en cuenta la disponibilidad de vehículos en la zona, y la distancia entre la planta de beneficio y el campo de destino que se encuentran relativamente cerca. Los vehículos encargados para esta actividad son camiones cisterna que poseen una condición de llenado máximo del 95% de su volumen, el tanque cisterna se referencia como “mini bulk delivery sistema” con un sistema de súper aislamiento compuesto, tiene una capacidad máxima de 30M3 y una máxima presión de trabajo permitida de 1.6 Mpa, lo que permite que se mantenga el CO₂ líquido refrigerado.

6.8 COSTOS POR CONSIDERAR PARA CASO JUGUETE

El último aspecto para considerar, como cualquier proyecto de ingeniería son los costos asociados a este, la importancia de este aspecto radica en que es un factor decisivo para su real implementación. En este sentido en el presente apartado se busca brindar una visión aproximada de los costos a considerar en este tipo de proyectos, basándose en cada una de fases que se han desarrollado: obtención del biogás, separación y captura y transporte. En la siguiente tabla se presenta la relación de costos aproximados y el detalle de cada uno, así como la fuente bibliográfica de la que se ha consultado.

Tabla 27. Resumen de costos asociados a la utilización del biogás en caso juguete

Etapa	Descripción técnica	Costo (USD)	Referencia
Transporte	Comprende dos valores cotizados por trayectos: COP/km cargado + COP/ hr de uso referentes a un cisterna	3.594	[68]
Captura	Comprende los valores por equipo dentro del proceso y los resultados de costos de los procesos 1 y 2, así como la compresión del gas saliente.	286643,774	[59]
Biorreactor	Incluye el tanque de igualación, el biorreactor UASB, torre de desorción, instrumentación, facilidades eléctricas.	171000	[69]
Total tiempo requerido		461.238	

6.9 RESULTADOS DEL CASO JUGUETE

Tal como se mencionó en el apartado de contextualización del piloto de inyección, se pretende inundar el 10% del espacio poroso, que a condiciones de yacimiento corresponde a 1.844.846 ft³, que con un factor volumétrico del 1,09 BY/BF, se tendrían 1.692.516 ft³, ahora bien, conociendo que la corriente de CO₂ perteneciente al biogás obtenido es de 31.430ft³/d, resulta necesario analizar los tiempos de cada una de las etapas del proceso, como son: tiempo de procesamiento del RFF, tiempos de tratamiento en el biorreactor, tiempos de proceso de captación de CO₂ y tiempos de transporte, para así conocer el número de días en que se podría tener el volumen de CO₂ requerido.

Un parámetro para evaluar la viabilidad técnica de un proceso es la disponibilidad del producto en cuestión, por esta razón es imprescindible conocer el tiempo requerido para la obtención de CO₂ que se inyectaría en campo. La tabla 28 muestra el detalle del tiempo requerido para obtener 47926m³ de CO₂ correspondientes a la necesidad en campo.

Tabla 28. Resumen técnico de la obtención de CO₂ para su aplicación.

Etapa	Descripción técnica	Tiempo requerido
Transporte	El volumen requerido en términos de CO ₂ líquido, equivale 86m ³ , que se transportarían en 3 viajes de cisterna de 30 M ³ a una presión de 3 Mpa, teniendo en cuenta un recorrido de aproximadamente 48km y considerando tiempo de ida, descargue y regreso y horarios de tránsito de vehículo pesado.	1,25
Almacenamiento	Es un proceso continuo y directo a la corriente de generación de CO ₂ , se emplean 3 tanques de almacenamiento en serie, de un modelo típico, con capacidad de 30m ³ a 2,5 Mpa	0
Captura	Con una corriente molar de 34.965 kmol/ hr, se tiene que el proceso de captura requiere de 1 hora por cada 823m ³ de CO ₂ procesado.	2,8
Biorreactor	El volumen del biorreactor es de 96m ³ , con un tiempo de retención de 8 hr, lo que indica que se procesan 240 m ³ de POME en 20 hrs	53
Total tiempo requerido		57,05

7. CONCLUSIONES

El producto de la revisión presentada en este libro proporciona un valor a la industria ya que abre una puerta hacia la inclusión de la biomasa dentro de los procesos, con el que se podrían plantear propuestas interesantes de desarrollo ingenieril.

Se observó la relevancia que toma el método de selección de la biomasa a emplear para la obtención de biogás, ya que de esta depende cualquier proceso al cual deba someterse la materia en cuestión, sumado a esto aspectos como localización, impactos ambientales y sociales le agregan valor al proyecto, al permitirlo abarca de la manera más realista posible.

Se evidenció la influencia de la demanda química de oxígeno dentro del proceso de obtención del biogás, el cual permite que la materia que se degrade se convierta aproximadamente en su 90% en biogás.

Se demostró de manera teórica la viabilidad técnica de la obtención de biogás y utilización en un proceso de inyección de gas, a través del cálculo de los volúmenes de CO₂ requeridos por el proceso de recuperación y los producidos por medio de obtención de biogás, dando como resultado que para alimentar un proceso de inyección de CO₂ convencional con 34.529 ft³ de CO₂ se requieren 57 días que corresponden a el procesamiento de 400 Tn RRF/ d.

Pese a que se demostró la viabilidad teórica del proyecto, es necesario resaltar que no es factible ya que, aunque se cuente con los volúmenes de biomasa requeridos, las limitadas capacidades de los reactores no permitirían que se desarrollara de la mejor manera el proyecto, alentando el proceso y, por ende, aumentando los costos de inversión de manera significativa.

Son innegables los beneficios que traen la producción de biogás a partir del POME, pues además de las ventajas ambientales y sociales, ya que abre una brecha a el relacionamiento entre las industrias y pequeños cultivadores, trae consigo beneficios económicos al producir a partir de un desecho, diversas sustancias que tienen usos rentables como los biocombustibles.

8. RECOMENDACIONES

En la medida que se desarrolla un proyecto se abren un sin número de oportunidades de investigación, y este caso no es la excepción. El biogás es una sustancia que por sus características composicionales se puede emplear para diversas áreas, se propone dar una mirada a la utilización del biogás a través de una simulación del yacimiento para entender su comportamiento y posibles beneficios, sumado a la posibilidad de su aprovechamiento al 100%.

En cualquier caso, que se desee emplear biomasa para generación de biogás a través de biodigestión, es necesario identificar cuál es el reactor que mejor se ajusta a las condiciones del proceso y tener claro los límites de capacidad, ya que un mal manejo de esa información podría entorpecer cualquier proyecto viable.

En relación con la segunda recomendación, si se va a proponer la biomasa para conversión energética, se recomienda caracterizar la biomasa, para que, conociendo su composición detallada se someta a un proceso de pretratamiento antes de la conversión, lo que resultará brindando un biogás con mayor porcentaje de metano.

BIBLIOGRAFÍA

Ahmad A, Ghufuran R, Wahid ZA. Bioenergy from anaerobic degradation of lipids in palm oil mill effluent. *Rev Environ Sci Biotechnol* 2011; 10:353–76. <https://doi.org/10.1007/s11157-011-9253-8>.

Álvarez S., Mauricio, Arias A., Nolver, Bernal H., Paloma, y otros. Generalidades de la agroindustria de la palma de aceite. [en línea] Colombia: Bogotá,. [Fecha consulta: 3 de agosto 2022] URN:ISBN:978-958-83660-06-5.

Amendola, Luis. Impacto de los capex y opex en la gestión de activos.

Angarita Martínez, Didier Harley, et al. Factibilidad técnica para producir biogás a partir de un proceso de digestión anaerobia en el tratamiento de aguas residuales de la industria de la palma aceitera (POME). 2022.

Aponte Diaz, Iván Fabricio; Velez Contreras, Juan Sebastián. Evaluación técnica y financiera del uso de un biorreactor anaerobio para el tratamiento de los residuos sólidos orgánicos generados en campo Rubiales como modelo de estandarización. 2019. Tesis de Licenciatura. Fundación Universidad de América.

Borasino Deustua, Elena, 2016, Lima, Perú , Capítulo 2. La cadena de la palma aceitera en contexto, disponible en: http://biblioteca.clacso.edu.ar/Peru/grade/20161013025755/LIBROGRADE_palma.pdf.

Borasino, Elena. Capítulo 2 La cadena de la palma aceitera en contexto. C3%B3n-activos-amendola. Recuperado en 15 de noviembre de 2017.

Carrasco, Juan E, Máster en Energías Renovables y Mercado Energético, Módulo Biomasa, 2008

Casero, P., et al. Captura de CO₂ en procesos pre-combustión. Experiencia real de ELCOGAS en GICC Puertollano. Boletín del Grupo Español del Carbón, 2015, no 35, p. 2-7.

Chile, Minenergia, Manual de Biogás, 2011, disponible en (<https://www.fao.org/3/as400s/as400s.pdf>).

Colombia, Congreso de la República, ley 1715 de 2014, Disponible en: <https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma.php?i=57353>.

Congreso De La República De Colombia, Ley 1715 De 2014, Integración de las energías renovables no convencionales al sistema energética nacional.

Corona Zúñiga, Iván. Biodigestores. 2007.

Correa Zúñiga, Iván, 2007, Biodigestores, Monografía, Universidad Veracruzana, México, disponible en: https://www.usfx.bo/nueva/vicerrectorado/citas/TECNOLOGICAS_20/Ingenieria%20de%20Petroleo%20y%20Gas/75.pdf.

D. A. Curbelo Alonso, D. A. Valdés Delgado Y. D. B. Garea Moreda, «Generación de electricidad a partir de bagazo en Cuba.,» de Memoria - Reunión regional sobre generación de electricidad a partir de biomasa, Montevideo, Uruguay, Dirección de productos forestales, FAO, Roma, 1995.

Dinero, «¿Como está el sector ganadero en Colombia?,» 27 09 2016. [En línea]. Available: <https://www.dinero.com/pais/articulo/como-esta-el-sector-ganadero-en-colombia/232274>. [Último acceso: 22 01 2020].

Elizabeth Tilley, Lukas Ulrich, Christoph Lüthi, Philippe Reymond, Roland Schertenleib y Christian Zurbrügg, Reactor anaerobio de flujo, Consultado en 2022, disponible en: (<https://sswm.info/es/gass-perspective-es/tecnologias-de/tecnologiasdesaneamiento/tratamiento semicentralizado/reactor anaerobiode flujo o ascendente#:~:text=El%20reactor%20anaerobio%20de%20flujo,2018>).

European Technology Platform For Zero Emission Fossil Fuel Power Plants. The cost of CO₂ Transport Post demonstration CCS in the EU. [s.l.]: [s.n.], 2020. 53 p.

Gámez, Nancy; Cobo, Martha. Purificación de dióxido de carbono emitido en plantas de tratamiento de gas. Ciencia en Desarrollo, 2018, vol. 9, no 2, p. 137-148.

García, Jesús A.; Yañez, Edgar E. Generación y uso de biomasa en plantas de beneficio de palma de aceite en Colombia. Revista Palmas, 2010, vol. 31, no 2, p. 41-48.

Grupo de investigación en procesos químicos y bioquímicos de la facultad de ingeniería de la Universidad Nacional de Colombia y Centro de desarrollo industrial TECSOL. Estimación del potencial de conversión a biogás de la biomasa en Colombia y su aprovechamiento. Bogotá D.C.: [s.n.], 2018. 216 p. CONTRATO 001 DE 2017 UPME-UNAL. Informe Final.

H. Ali, N. H. Eldrup, F. Norman, R. Skagestad y R. E. Øi, «Cost Estimation of CO₂ Absorption Plants for CO₂ Mitigation—Method and Assumptions,» vol. 88, pp. 10-23, 2019.

Hafner, S. D., Koch, K., Carrere, H., Astals, S., Weinrich, S., & Rennuit, C. (2018). Software for biogas research: Tools for measurement and prediction of methane production. SoftwareX, 7, 205–210. <https://doi.org/10.1016/J.SOFTX.2018.06.005>).

Hafner, Sasha D., et al. Software for biogas research: Tools for measurement and prediction of methane production. *SoftwareX*, 2018, vol. 7, p. 205-210.

Home - Zero Emissions Platform. Zero Emissions Platform [página web]. [Consultado el 1, octubre, 2022]. Disponible en Internet: <<https://zeroemissionsplatform.eu/>>.

Hosseini SE, Bagheri G, Wahid MA, Saat A. Clean fuel, clean energy conversion technology: experimental and numerical investigation of palm oil mill effluent biogas flameless combustion. *BioResources* 2015;10:6597–609.

IEA, Special Report on Carbon Capture Utilization and Storage. CCUS in clean energy transitions., International Energy Agency, 2020.

International Energy Association, Bioenergy, 03 2022 available <https://www.iea.org/fuels-and-technologies/bioenergy>

Ivancic, Helena; Koh, Lian Pin. Evolution of sustainable palm oil policy in Southeast Asia. *Cogent Environmental Science*, 2016, vol. 2, no 1, p. 1195032.

J. García, M. Cárdenas, E. Yáñez, 2010. En *PALMAS* Vol. 31 No. 2, 2010

K. Kuparinen, E. Vakkilainen y T. Tynjälä, Biomass-based carbon capture and utilization in kraft pulp mills, *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, 2019.

Koh y Wilcove, Myers et al. 2000, Reino Unido, *The Impact of Oil Palm Expansion on Environmental Change: Putting Conservation Research in Context*, 2011, disponible en: <https://www.researchgate.net/publication/221915737>.

línea.2016...Disponible en: <https://es.linkedin.com/pulse/impacto-de-los-capex-y-opex-en-lagesti%>

M. Finkenrath, Cost and Performance of Carbon Dioxide Capture from Power Generation, IEA Energy Pap. (2011) 51. doi:10.1002/ceat.201100444

M. Songolzadeh, M. Soleimani, M. Takht Ravanchi y R. Songolzadeh, Carbon Dioxide Separation from Flue Gases: A Technological Review Emphasizing Reduction in Greenhouse Gas Emissions, Hindawi Publishing Corporation. The Scientific World Journal, 2014.

Madr. (Julio de 2016). Estadísticas Agropecuarias del Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural. Secretarías de agricultura departamentales y Alcaldías municipales 2016. Bogotá, Colombia: MADR 2016.

Marroig Martínez, Gabriel. Unidad de separación de gases ácidos de GNL de la planta Gorgón en Barrow Island. 2015.

Morales, Hernán Y Torres, Cristian. Tecnologías de captura y secuestro de, [s.l.]: [s.n.], 2008. 52 p.

Morero, Betzabet; Campanella, Enrique A. Simulación del Proceso de Absorción Química con Soluciones de Aminas para la Purificación Biogás. Información tecnológica, 2013, vol. 24, no 1, p. 25-32.

Moya Álamo, Cristian, et al. Captura de CO₂ mediante operaciones de separación basadas en líquidos iónicos. 2017.

Munasinghe, Mohan, et al. Value–Supply Chain Analysis (VSCA) of crude palm oil production in Brazil, focusing on economic, environmental, and social sustainability. *Sustainable Production and Consumption*, 2019, vol. 17, p. 161-175.

Muñoz, César Bartolomé; Peris, Pedro Mora; Rodríguez, José David Recalde. Estado del arte de las tecnologías de captura y almacenamiento de CO. Ficem. Org, 2011.

Network, Biomass Users. BUN-CA. 2002.

Nogués, Fernando Sebastián. *Energía de la Biomasa (volumen I)*. Universidad de Zaragoza, 2010.

Observatorio De costes del transporte de mercancías por carretera [Anónimo]. Portada | Ministerio de Transportes, Movilidad y Agenda Urbana [página web].

P. Angy, "Propuesta de parámetros de diseño de un reactor UASB para el tratamiento de aguas residuales porcinas", 2018.] / [R. Méndez, "Evaluación de un reactor UASB para aguas porcinas inoculado con líquido ruminal" 2013

Peña, S. *La biomasa, importancia, características y formas de preparación*. Univ. Politécnica Madrid, 2016.

Perfetti, Juan José, et al. *Políticas para el desarrollo de la agricultura en Colombia* [en línea]. LIB_2013_Políticas para el desarrollo de la agricultura_Completo.pdf, Bogotá, Colombia. Abril, 2013. Disponible en Internet: <https://www.repository.fedesarrollo.org.co/bitstream/handle/11445/61/LIB_2013_Políticas%20para%20el%20desarrollo%20de%20la%20agricultura_Completo.pdf?sequence=1&isAllowed=y>.

Perfetti, Juan José, et al. Políticas para el desarrollo de la agricultura en Colombia [en línea]. LIB_2013_Políticas para el desarrollo de la agricultura_Completo.pdf, Bogotá, Colombia. Abril, 2013. Disponible en Internet: <https://www.repository.fedesarrollo.org.co/bitstream/handle/11445/61/LIB_2013_Políticas%20para%20el%20desarrollo%20de%20la%20agricultura_Completo.pdf?sequence=1&isAllowed=y>.

Ramírez Carrero, Ricardo, et al. Plan Energético Nacional 2020-2050 [en línea]. Bogotá: [s.n.], 2019. 86 p. Disponible en Internet: <https://www1.upme.gov.co/DemandaEnergetica/PEN_documento_para_consulta.pdf>.

Ramírez-Contreras, N. E., Ramírez, Á. S. S., González, E. M. G., & Yáñez A., E. E. (2011). Caracterización y manejo de subproductos del beneficio del fruto de palma de aceite. Boletín Técnico No. 30, (30), 1–46. <https://doi.org/10.5897/AJB11.3582> <https://publicaciones.fedepalma.org/index.php/palmas/article/view/11644/11636>

Región Administrativa Y De Planeación Especial Rap-E Y – Universidad Distrital Francisco José De Caldas. Biomasa en la región central [en línea]. Cptl06-BIOMASA-EN-LA-REGIÓN-CENTRAL.pdf, Caldas, Colombia. 2020. Disponible en Internet: <<https://regioncentralrape.gov.co/wp-content/uploads/2020/05/Cptl06-BIOMASA-EN-LA-REGIÓN-CENTRAL.pdf>>.

Región Administrativa y de Planeación Especial Rap-E Y – Universidad Distrital Francisco José De Caldas. Biomasa en la región central [en línea]. Cptl06-BIOMASA-EN-LA-REGIÓN-CENTRAL.pdf, Caldas, Colombia. 2020. Disponible en Internet: <<https://regioncentralrape.gov.co/wp-content/uploads/2020/05/Cptl06-BIOMASA-EN-LA-REGIÓN-CENTRAL.pdf>>.

Saldívar Esparza, Santiago, et al. Tecnologías de captura y almacenamiento de dióxido de carbono. 2017.

Santosa, Sri Juari. Palm oil boom in Indonesia: from plantation to downstream products and biodiesel. CLEAN–Soil, Air, Water, 2008, vol. 36, no 5-6, p. 453-465.

Santosa, Sri. (2008). Palm Oil Boom in Indonesia: From Plantation to Downstream Products and Biodiesel. CLEAN – Soil, Air, Water. 36. 453 - 465. 10.1002/clen.200800039.

Schallenberg Rodríguez, Julieta C., et al. Energías renovables y eficiencia energética. 2008.

Secretaría de Energía (Argentina), Energías Renovables 2008 - Energía Biomasa

Sridhar MKC, Adeoluwa OO. Palm oil industry residues. Biotechnology for agro-industrial residues utilization: Utilization of Agro-Residues. 2009. https://doi.org/10.1007/978-1-4020-9942-7_18.)

Tecnologías para el uso y transformación de biomasa energética, Mundi Prensa, Ediciones Parainfo, Madrid, España, 2015.

Tomada de “ESTADÍSTICAS home. Agronet Mincultura [página web]. Disponible enInternet:<<https://www.agronet.gov.co/estadistica/Paginas/home.aspx?cod=1>>”.

Triana Zárate, Gabriel. Análisis de la sostenibilidad ambiental del cultivo de palma de aceite en el contexto de la industria de los biocombustibles en Colombia: [en lí-nea] 2020176 [Fecha consulta: 3 de agosto 2022].

Unidad De Planeación Minero Energética, UPME, et al. Atlas del potencial energético de la biomasa residual en Colombia [en línea]. Bucaramanga: Bucaramanga (Colombia): Universidad Industrial de Santander, 2011. 180 p.

Unidad De Planeación Minero Energética, UPME. Balance energético colombiano . <https://www1.upme.gov.co/DemandayEficiencia/Paginas/BECO.aspx> [página web]. (2020).

Unidad de Planeación Minero-Energética, UPME. Plan Energético Nacional 2020-2050. Bogotá D.C: [s.n.], 2019. 86 p.

Van Dam, Jan. Subproductos de la palma de aceite como materias primas de biomasa. Revista Palmas, 2016, vol. 37, p. 149-156.

Velázquez Martí, Borja. Aprovechamiento de la biomasa para uso energético. Editorial Universidad Politécnica de València, 2018.)

Zamírez Carrero, Ricardo, et al. Plan Energético Nacional 2020-2050 [en línea]. Bogotá: [s.n.], 2019. 86 p. Disponible en Internet: <https://www1.upme.gov.co/DemandaEnergetica/PEN_documento_para_consulta.pdf>.ramirez

ANEXOS

ANEXO 1. CORRELACIÓN CAMPOS-DEPARTAMENTOS

