

UNIVERSIDAD
NACIONAL
DE COLOMBIA

Aprovechamiento energético de la codigestión anaeróbica de la fracción orgánica de residuos sólidos urbanos y residuos de cosecha de plátano para la producción de biogás

Diana Marcela Durán Hernández

Universidad Nacional de Colombia

Facultad de Ingeniería, Departamento de Ingeniería Química

Bogotá, Colombia

2020

Aprovechamiento energético de la codigestión anaeróbica de la fracción orgánica de residuos sólidos urbanos y residuos de cosecha de plátano para la producción de biogás

Diana Marcela Durán Hernández

Tesis presentada como requisito parcial para optar al título de:

Magister en Ingeniería Química

Director:

Ph.D. Mario Enrique Velásquez Lozano

Línea de Investigación:

Bioprocesos

Grupo de Investigación:

Procesos Químicos y Bioquímicos

Universidad Nacional de Colombia

Facultad de Ingeniería, Departamento de Ingeniería Química

Bogotá, Colombia

2020

Tesis aprobada por la facultad de Ingeniería Química en cumplimiento de los requisitos exigidos para otorgar el título de: **Magister en Ingeniería Química**

PhD Mario Enrique Velásquez Lozano
Director de la tesis

Jurado

Jurado

Universidad Nacional de Colombia
Facultad de Ingeniería, Departamento de Ingeniería Química
Bogotá, Colombia
2020

Dedicatoria

A mis papás y mis hermanas por su confianza y apoyo. Por inculcar en mí el respeto hacia el planeta, y que desde mi profesión he aprendido a reflejarlo.

A Lorenzo por su compañía y motivación en este grato recorrido.

Agradecimientos

Este documento no hubiese sido posible sin la ayuda de las siguientes personas e instituciones, por este motivo dedico este espacio para agradecerles de la manera más sincera por transmitirme sus conocimientos y compartir conmigo muchos gustos, especialmente el de la investigación.

Universidad Nacional de Colombia, gracias por abrirme las puertas y ser parte de este crecimiento profesional y académico.

Mario Velásquez, mi director de tesis, le agradezco por haber depositado en mí su confianza y permitirme entrar a su grupo de investigación, a su laboratorio, en donde más que colegas fueron amigos. A Margareth, Juan Pablo, Diana, Angela, Paola y Felipe gracias por aguantarse los malos olores y acogerme en el grupo.

Nely Carreras, responsable del grupo de residuos del departamento de medio ambiente en el centro de Investigaciones energéticas, medioambientales y tecnológicas, CIEMAT, a quien desde que la conocí fue mi segunda directora. Eternamente agradecida por haberme aceptado para realizar mi pasantía de investigación, fueron los meses más provechosos. Gracias por seguir manteniendo esa confianza y tenerme en cuenta para trabajos futuros. A todo el equipo de Ciemat: José, Raúl, Gabriel, Rocío y Nerea gracias por hacerme sentir en casa y brindarme su ayuda cuando la necesite. A Juan Luis, por sus consejos, compartir sus experiencias académicas y motivación.

Ignacio Ballesteros, investigador titular de la división de Energías Renovables en CIEMAT, gracias por toda la colaboración prestada, su acompañamiento y permitirme el ingreso a sus laboratorios. A todo el grupo: Miguel, Javier y Noelia por compartir risas en las mañanas de trabajo en el laboratorio. José Rincón, profesor emérito de la Universidad Nacional de Colombia, gracias por toda la confianza que ha depositado en mí en todos estos años de trabajo. Gracias a Adolfo por su amistad y acompañarme a recoger los inóculos.

Fundación Ceiba, agradezco por su apoyo financiero, por considerar mi trabajo importante para el desarrollo de la región Orinoquia. A la UPME, por financiar proyectos de biogás con impacto nacional. Finalmente, agradezco a todos mis amig@s y profesores con quienes me encontré en este grato recorrido.

Resumen

El aprovechamiento energético de la biomasa residual ha tenido una alta acogida a nivel global debido al continuo crecimiento de la demanda energética, la seguridad alimentaria y el rechazo al uso de combustibles fósiles por ser estos causantes de altas emisiones de CO₂ a la atmosfera. En esta investigación se estudió la utilización de la fracción orgánica de residuos sólidos urbanos (FORSU), y residuos de cosecha de plátano denominado en este estudio como banano de la especie *musa acuminata* (RCB, pseudotallo y raquis) como sustratos en el proceso de digestión anaerobia para la producción de metano, estudiando al mismo tiempo la explosión de vapor (SE) como pretratamiento para aumentar la biodegradabilidad de los RCB. Los ensayos de potencial metanogénico (PBM) se realizaron teniendo en cuenta la norma internacional VDI 4630. La velocidad de biodegradabilidad de los RCB aumento en 25 % cuando se pretrataron con SE a 180 °C durante 10 min. Por su parte la FORSU es un sustrato idóneo por su alta biodegradabilidad, y que puede usarse para mejorar los procesos de digestión de otros sustratos. Como resultado de la codigestión de FORSU y RCB se obtuvo 457.47 L_{CH₄}/kg VS equivalente a 201.85 kWh/t de biomasa húmeda. Además, se presentaron los aspectos más importantes para llevar a cabo una planta de biogás a partir de pseudotallo en lugares con baja demanda energética y disponibilidad de terrenos para plantación de banano de 6.26 kWh y 0.6 ha respectivamente.

Palabras clave: biogás, biomasa residual, digestión anaerobia, explosión con vapor, metano.

Abstract

The use of residual biomass for energy has been widely accepted globally due to the continuous growth of energy demand, food security and the rejection of the use of fossil fuels as they are the cause of high CO₂ emission into the atmosphere. In this research, it was studied the use of the organic fraction of municipal solid waste (OFMSW) and plantain crop residues named in this study as banana of the *musa acuminata* species (BCR, pseudostem and rachis) as substrates in the anaerobic digestion process for the production of methane, while it was studied the steam explosion (SE) as a pretreatment to increase the biodegradability of BCR. The biomethane potential (BMP) was carried out taking into account the international standard VDI 4630. The biodegradability rate of BCRs increased by 25% when they were pretreated with SE at 180 ° C for 10 min. For its part, OFMSW is an ideal substrate due to its high biodegradability, and it can be used to improve the digestion processes of other substrates. As a result of the codigestion of OFMSW and BCR, 457.47 LCH₄ / kg VS was obtained, equivalent to 201.85 kWh / t of wet biomass. In addition, the most important aspects were presented to carry out a biogas plant from pseudostem in places with low energy demand and availability of land for banana plantations, 6.26 kWh and 0.6 ha respectively.

Keywords: anaerobic digestion, biogas, methane, residual biomass, steam explosion.

Contenido

	Pág.
Resumen	
Abstract	
Introducción	
1 Objetivos.....	27
1.1 Objetivo general	28
1.2 Objetivos específicos	28
2 Generalidades.....	29
2.1 La biomasa	30
2.1.1 Clasificación de la biomasa	30
2.1.2 Composición química de la biomasa	31
2.1.3 Procesos de conversión energética de la biomasa.....	33
2.1.4 Residuos de cosecha de banano	34
2.1.5 Fracción orgánica de residuos sólidos urbanos.....	36
2.1.6 Lodos de plantas de tratamiento de agua residual	37
2.2 Pretratamientos de la biomasa	38
2.2.1 Físicos	39
2.2.2 Químicos	39
2.2.3 Fisicoquímico y térmicos	39
2.2.4 Biológico.....	40
2.3 La digestión anaerobia	41
2.3.1 Etapas del proceso	41
2.3.2 Microbiología del proceso.....	43
2.3.3 Parámetros que afectan el proceso.....	46
2.3.4 Mono- y co-digestión anaeróbica	48
2.3.5 Aplicaciones actuales de la digestión anaerobia	49
2.3.6 Valorización del biogás y biometano.....	50
2.4 Digestión anaerobia de FORSU y RCB	52
2.4.1 Digestión anaeróbica de FORSU.....	52
2.4.2 Digestión anaerobia de RCB sin pretratar	53
2.4.3 Digestión anaeróbica de RCB pretratados.....	53
2.4.4 Codigestión de FORSU y RCB	53
2.5 Indicadores de evaluación de proyectos de biogás rural	53
2.5.1 Incentivos tributarios en Colombia	57
3 Potencial metanogénico de la FORSU y residuos de cosecha de banano	59
3.1 Introducción	60

3.2	Metodología.....	61
3.2.1	Sustratos e inóculo	61
3.2.2	Método experimental.....	63
3.2.3	Diseño experimental.....	67
3.2.4	Métodos analíticos.....	67
3.2.5	Parámetros de control.....	69
3.2.6	Análisis estadístico.....	70
3.3	Resultados y discusión	71
3.3.1	Caracterización de sustratos e inóculo.....	71
3.3.2	Ensayos de monodigestion y rendimiento de metano	74
3.3.3	Análisis de cinética.....	77
3.3.4	Composición del biogás.....	77
3.3.5	Análisis de azufre.....	78
3.4	Conclusiones.....	80
4	Codigestión anaerobia de los residuos de cosecha de banano pretratados por explosión con vapor y la FORSU.....	81
4.1	Introducción.....	82
4.2	Metodología.....	84
4.2.1	Sustratos e inóculo	84
4.2.2	Método experimental.....	86
4.2.3	Diseño experimental.....	89
4.2.4	Pretratamiento de la biomasa- explosión con vapor	90
4.2.5	Métodos analíticos.....	91
4.2.6	Parámetros de control.....	93
4.2.7	Análisis estadístico.....	94
4.3	Resultados y discusión	95
4.3.1	Composición de los sustratos e inóculo.....	95
4.3.2	Efecto de la explosión de vapor sobre RCB	98
4.3.3	Evaluación de codigestion de FORSU y RCB.....	100
4.4	Conclusiones.....	106
5	Análisis técnico económico de una planta de biogás rural: caso de estudio	107
5.1	Introducción.....	108
5.2	Metodología.....	109
5.2.1	Contexto de aplicación	109
5.2.2	Evaluación técnica.....	111
5.2.3	Evaluación económica.....	117
5.2.4	Evaluación financiera	122
5.3	Resultados y discusión	122
5.3.1	Balance de masa.....	123
5.3.2	Balance de energía	126
5.3.3	Estimación de costos	128
5.4	Conclusiones.....	136
6	Conclusiones y recomendaciones.....	137
6.1	Conclusiones.....	138
6.2	Recomendaciones.....	139
7	ANEXOS.....	141

A. Anexo: Análisis estadístico	142
B. Anexo: Mapa de zonificación	145
C. Anexo: Cálculos de balance de masa para la planta de biogás rural	146

Lista de figuras

	Pág.
Figura 2-1. Clasificación de la biomasa de acuerdo a su uso, composición, sector y origen.	31
Figura 2-2. Componentes principales de la pared celular de una planta. ^a residuos de cosecha de banano (pseudotallo y raquis).	33
Figura 2-3. Procesos de conversión de energía considerando el contenido de humedad en la biomasa	34
Figura 2-4. Componentes de una planta de banano y residuos de cosecha generados por tonelada de banano.....	35
Figura 2-5. Destinos de los residuos de pseudotallo (a) y raquis (b) después de la cosecha de banano en departamentos con mediana densidad de cultivo como Caldas.	35
Figura 2-6. Valorización de los residuos sólidos urbanos –RSU ^a combustibles derivados de residuos, ^b red de gas natural, ^c disposición final en rellenos sanitarios modernos que controlen las emisiones de metano a la atmosfera.	37
Figura 2-7. Efecto del pretratamiento en biomasa lignocelulósica.....	38
Figura 2-8. Etapas de la digestión anaeróbica: 1 (hidrolisis), 2 (acidogénesis), 3 (acetanogénesis), y 4 (metanogénesis).....	44
Figura 2-9. Microorganismos y enzimas involucrados en cada fase de la digestión anaerobia. 1 (hidrolisis, bacterias hidrolíticas), 2 (acidogénesis, bacterias acidogénicas), 3 (acetanogénesis, bacterias acetogénicas incluidas bacterias productoras de hidrógeno y homoacetogénicas), y 4 (metanogénesis, bacterias metanogénicas incluidas bacterias acetoclásticas e hidrogenotróficas). .	45
Figura 2-10. Esquema general de un digester anaeróbico con agitación.....	48
Figura 2-11. Comparación de biocombustibles producidos a partir de cultivos energéticos (izquierda) testeado por la distancia recorrida por un automóvil. ^a BtL biomasa a biocarburantes líquidos (por sus siglas en inglés, biomass to liquid) ^b Distancia recorrida utilizando biometano como combustible producido a partir de malta, paja y colza.	52
Figura 3-1. Caracterización de la fracción orgánica de residuos sólidos urbanos (FORSU) discriminada en cáscaras de frutas y vegetales y desechos de comida cocinada recolectada durante una semana. Los datos están expresados en porcentaje.	62
Figura 3-2. Esquema simplificado equipo AMPTS II para ensayos de biodegradabilidad.	64
Figura 3-3. Esquema simplificado equipo Anaero Technology para ensayos de biodegradabilidad.	65
Figura 3-4. Curva exponencial de producción acumulada de metano de la FORSU, pseudotallo y raquis en un ensayo de digestión anaerobia a 37°C. (a). Producción de metano diaria en ensayos de monodigestión (b). Nota: Los valores incluyen la influencia del inóculo en ambas gráficas.	75
Figura 3-5. Porcentaje de azufre en diferentes muestras de alimentos.	79

Figura 4-1. Sustratos adecuados (reducción de tamaño de partícula) para su utilización en los ensayos de codigestión. a (pseudotallo), b (raquis), c (fracción orgánica de residuos sólidos urbanos – FORSU).....	85
Figura 4-3. Producción acumulada de metano (NL/kg VS) durante 29-35 días a 37 °C en ensayos de codigestión anaeróbica con FORSU y RCB pretratados. nota: influencia del inóculo no sustraída.	100
Figura 4-4. Producción de metano de las mezclas de codigestión. M1 (FORSU-P160-R180), M2 (FORSU-P180-R180), M3 (FORSU-P160-R200), M4 (FORSU-P180-R200) y M5 (FORSU-P-R). El punto y cada extremo corresponden a los valores obtenidos en cada reactor réplica.	102
Figura 5-1. Diagrama de bloques del proceso de digestión anaerobia de pseudotallo (P).	113
Figura 5-2. Diagrama de flujo del proceso de digestión anaerobia de pseudotallo de banano.	114
Figura 5-3. Matriz de debilidades, oportunidades, fortalezas, y amenazas (DOFA) de un proyecto de biogás rural a base de pseudotallo.....	117
Figura 5-4. Diagrama de la tecnología seleccionada después de realizar la superestructura - producción de biogás a partir de pseudotallo.....	119
Figura 7-1. Índices de cobertura de gas combustible en Colombia año 2017. Cobertura de gas natural en azul. Cobertura de Gas Licuado de Petróleo (GLP) en amarillo, y sin cobertura en verde.	145

Lista de tablas

	Pág.
Tabla 2-1 Reacciones acetanogénicas	42
Tabla 2-2. Reacciones metanogénicas	43
Tabla 2-3. Aplicaciones del biogás y su grado de purificación.....	51
Tabla 2-4. Antecedentes de mono y co-digestión anaerobia de la fracción orgánica de residuos sólidos urbanos -FORSU	54
Tabla 2-5. Antecedentes de mono y co-digestión anaerobia de residuos de cosecha de banano (pseudotallo y raquis).	55
Tabla 2-6. Antecedentes de mono y co-digestión anaerobia de residuos de cosecha de banano (pseudotallo y raquis) pretratados con métodos fisicoquímicos y químicos para el aumento de su degradabilidad.....	56
Tabla 3-1. Condiciones de los ensayos de monodigestion de la FORSU, raquis y pseudotallo para determinar máximo potencial de metano.....	67
Tabla 3-2. Composición físico química de la FORSU, pseudotallo, raquis e inóculo para ensayos de degradabilidad.	73
Tabla 3-3. Caracterización físico química al inicio del ensayo de degradabilidad.....	75
Tabla 3-4. Caracterización físico química al final del ensayo de degradabilidad	76
Tabla 3-5. Rendimiento de metano teórico y experimental en los ensayos de degradabilidad de la FORSU, P y R.....	76
Tabla 3-6. Valores de la tasa específica de degradación obtenida en las monodigestiones.....	77
Tabla 3-7. Composición semanal promedio del biogás en los ensayos de monodigestión.....	78
Tabla 4-1. Parámetros de los ensayos de codigestión de la FORSU, R y P crudo y R y P pretratado	90
Tabla 4-2. Parámetros de control y su periodicidad en cada ensayo	94
Tabla 4-3. Composición de los sustratos e inóculo de los ensayos de codigestión anaeróbica.....	97
Tabla 4-4. Composición química de la SIA y la fracción líquida del pretratamiento de explosión con vapor.....	99
Tabla 4-5. Parámetros de control sobre cada ensayo al inicio de la codigestión	101
Tabla 4-6. Parámetros de control sobre cada ensayo al final de la codigestión	101
Tabla 4-7. Rendimiento de metano teórico y experimental de los RCB _P y las mezclas con su respectiva reducción de SV durante los ensayos de codigestión.....	103
Tabla 4-8. Sinergias y antagonismos producidos en la codigestión de FORSU, P y R.	105
Tabla 4-9. Parámetros de la cinética de degradación de las codigestiones de FORSU, P, y R.....	105

Tabla 5-1. Requerimientos básicos de biogás para un hogar campesino.	110
Tabla 5-2. Descripción de los procesos, etapas y equipos utilizados en la planta rural de biogás.	115
Tabla 5-3. Descripción de las corrientes con base en la Figura 5-2.....	116
Tabla 5-4 Parámetros de evaluación en la estimación de costos	120
Tabla 5-5. Costos indirectos	121
Tabla 5-6 Flujo másico de las corrientes del diagrama de flujo de producción de biogás	124
Tabla 5-7 Balance de masa por etapa.....	125
Tabla 5-8 Balance de masa global de la planta de producción de biogás.....	126
Tabla 5-9 Requerimiento de energía eléctrica de los equipos para la planta de biogás rural	126
Tabla 5-10. Costos de equipo por cantidad de materia prima o producto procesado.....	129
Tabla 5-11 Factores para determinar el costo final de la maquinaria y equipo	129
Tabla 5-12. Costos fijos del lugar y la construcción de la planta de biogás rural para producir gas domiciliario y cogeneración para una familia campesina	130
Tabla 5-13 Costos de materia prima de la planta de biogás rural para producir gas domiciliario y cogeneración para una familia campesina	131
Tabla 5-14 Costos directos de la planta de biogás rural para producir gas domiciliario y cogeneración para una familia campesina	132
Tabla 5-15 Costos indirectos de la planta de biogás rural para producir gas domiciliario y cogeneración para una familia campesina	133
Tabla 5-16 Costos de manufactura de la planta de biogás rural para producir gas domiciliario y cogeneración para una familia campesina	133
Tabla 5-17. Emisiones de GEI asociadas al uso de combustibles en zonas rurales	134
Tabla 5-18. Emisiones ahorradas por el uso de biofertilizante a cambio del fertilizante químico considerando la producción de 1 m ³ de biogás.....	135
Tabla 7-1 Composición del biogás a la salida del digestor anaerobio	147
Tabla 7-2. Composición del biogás a la entrada del cogenerador.....	149
Tabla 7-3. Oxígeno teórico para combustión en cogenerador	150
Tabla 7-4. Aire de combustión real considerando exceso de aire.....	150
Tabla 7-5. Consumo eléctrico de los equipos de la planta de biogás	153
Tabla 7-6 Calor de reacción de la combustión de metano, hidrógeno y sulfuro de hidrógeno en el cogenerador	154
Tabla 7-7 Capacidad calorífica de los gases de combustión	154

Abreviaturas

AGV: ácidos grasos volátiles
BR: biomasa residual
RCB: Residuos de cosecha de banano
RCP: Residuos de cosecha de plátano
bs: base húmeda
bs: base seca
C/N: relación carbono/ nitrógeno
CoDA: codigestión anaeróbica
CSTR: reactor de mezcla completa (en inglés- *Continuously stirred tank Reactor*)
DA: digestión anaerobia
ER: Energía renovable
FORSU: fracción orgánica de los residuos sólidos urbanos
FNCER: fuentes no convencionales de energía renovable
GEI: gases de efecto invernadero
GN: gas natural
HPLC: (en inglés- *High Performance Liquid Chromatography*)
MoDA: monodigestión anaeróbica
Mt: Millones de toneladas
NTK: nitrógeno total Keldahlj
P: pseudotallo
P160: pseudotallo pretratado a 160°C
P180: pseudotallo pretratado a 180°C
PBM: potencial bioquímico de metano
ppm: partes por millón
PTAR: planta de tratamiento de agua residual
R: raquis
R180: raquis pretratado a 180°C
R200: raquis pretratado a 200°C
RCB: residuos de cosecha de banano
RSU: residuos sólidos urbanos
SE: explosión con vapor (en inglés -*Steam Explosion*)
ST: solidos totales
STP: temperatura y presión estándar (en inglés -*Standard Temperature and Pressure*)
SV: sólidos volátiles
TRH: tiempo de retención hidráulica
ZNI: zonas no interconectadas

Introducción

El uso indiscriminado de combustibles fósiles y el aumento de la población son la causa principal del cambio climático. La capacidad de la naturaleza para absorber el impacto humano después del crecimiento explosivo de la población del siglo XX ha sido insuficiente, siendo necesario 1.5 Tierras para proporcionar los recursos naturales consumidos cada año [1], [2]. Esto ha llevado a la búsqueda de materias primas para aumentar la contribución de las energías renovables y el mantenimiento de la seguridad alimentaria. La biomasa es la cuarta fuente más grande del mundo después del petróleo, el carbón y el gas natural (GN) [3]. Su uso para la generación de energía crece debido a los problemas ambientales asociados al uso de combustibles fósiles, como la generación de gases de efecto invernadero (GEI) (3.9 GT de CO₂ en 2018 [4]), producción de material particulado (reflejado en la contaminación del aire que fue el quinto factor de riesgo de mortalidad en el mundo en 2017 [5]) y generación de residuos (2.01 billones de toneladas de residuos en 2016 [6]). En el 2017 el 19.3% de la energía primaria del mundo se produjo a partir de energías renovables (ER), cerca del 9 % a partir de biomasa tradicional (leña, estiércol, residuos de cosecha) y el restante mediante ER modernas como la hidroeléctrica, energía solar, eólica, geotérmica, y biogás [7].

A nivel mundial la participación en ER superó los 2 351 GW, siendo de la bioenergía (energía a partir de biomasa) 115 GW, 8% superior al año anterior [8]. En Colombia, durante el 2018 la capacidad de generación total fue 17.3 GW [9], siendo cerca del 1% Fuentes No Convencionales de Energía Renovable (FNCER). Se estima que para el 2030 la participación de FNCER tenga una capacidad instalada por encima de 1.5 GW, teniendo la mayor participación la energía eólica, geotérmica y biomasa; el biogás por su parte se proyecta con cerca de 80 MW [10]. La bioenergía a diferencia de la energía solar y eólica se considera una energía firme debido a que su fuente de generación (biomasa) puede almacenarse.

Gran potencial de FNCER en el país no se utiliza adecuadamente, por ejemplo, las centrales pequeñas hidroeléctricas tienen alrededor de 25 000 MW, la eólica es de 27 000 MW, la solar de 5-

6 kWh/m² día, producción de bagazo de caña por encima de 5 Mt, paja de arroz 4.5 Mt y por encima de 29 Mt de biomasa agrícola residual [11], teniendo esta última aplicaciones para la producción de biogás.

Existen diferentes fuentes de biomasa residual (BR) como los residuos provenientes de actividades forestales, agrícolas, pecuarios, industriales, y municipales; en este último se encuentran los lodos de plantas de tratamiento de agua residual (PTAR) y los residuos sólidos urbanos (RSU). Los RSU están compuestos por aproximadamente 50% de materia orgánica [12] (denominado fracción orgánica de residuos sólidos urbanos -FORSU), los lodos por su parte son una fuente de alta carga microbiana debido a que han estado en contacto con diferentes residuos, esto permite su uso en procesos biológicos.

Durante el 2016 se generaron cerca de 200 Mt de residuos orgánicos en Colombia [13], esta cifra incluyó los residuos de los principales cultivos del país (banano, plátano, caña de azúcar, caña panelera, maíz, arroz, café, palma de aceite), principales especies pecuarias (bovinos, porcinos, avícola), algunas industrias y residuos municipales de las principales ciudades. Se destaca de este estudio [14] la participación de los residuos de cosecha de plátano y banano, los cuales se totalizaron y se denominan en este estudio como Residuos de Cosecha de Banano (RCB) que en su mayoría son raquis (R) y pseudotallo (P) (alrededor del 40% de los residuos agrícolas) [15] y la participación de los lodos de PTAR y FORSU.

El manejo y aprovechamiento de la biomasa residual es muy diverso. En el sector rural el material orgánico se utiliza para compostaje, lombricultura, alimento animal y enmienda del suelo cuando se abandona en el sitio de cultivo; en otros casos se ha propuesto su utilización para la producción de productos de alto valor agregado, no obstante, el desarrollo de esta industria genera grandes cantidades de residuos que deben tratarse. Por ende, se explora el uso de la BR para la generación de energía a través de procesos térmicos o biológicos dependiendo el tipo de biomasa.

En el sector urbano colombiano se aprovecha menos del 1 % de los residuos, el resto se dispone en rellenos sanitarios, los cuales casi el 50 % tienen la vida útil vencida o está próxima a vencer [16]. La FORSU debido a su contenido de humedad (> 70%) y su alta biodegradabilidad puede aprovecharse en procesos de compostaje, lombricultura y procesos biológicos como la digestión anaerobia (DA). Este último proceso frente a otros es el más completo, dado a que se obtiene biogás

como energético y biol como fertilizante. Probablemente el mayor desafío en la DA de la FORSU es la heterogeneidad de su matriz en el tiempo y origen, esto varía características tales como contenido de azufre y nitrógeno, lo cual afecta directamente el proceso de DA y la calidad del biogás [17].

En el sector industrial, los ingenios azucareros alcanzan casi el 100% de aprovechamiento de sus residuos a través de procesos térmicos (combustión para cogeneración) [18], y las granjas porcinas como Fazenda presenta varios casos de éxito de aprovechamiento de residuos a través de DA para la producción de biogás y metano.

El plátano o banano, como se mencionó anteriormente, es un cultivo que deja grandes cantidades de residuos, es perenne, y crece con rapidez, razón por la que se cosecha durante todo el año; en el mundo se producen más de 120 millones de toneladas de banano al año [19]. Colombia participa con cerca del 2 % de la producción mundial [15]. Según la información de AGRONET, para el año 2017 se registró un área sembrada y una producción nacional total de banano de 414 556 ha y 3 911 054 toneladas respectivamente [15]. La generación de RCB (R y P) fue de aproximadamente 23.5 Mt para ese mismo año [20]. Esto se debe a que la planta de banano fructifica solo una vez en su vida, en consecuencia, una vez se toma el racimo, se tumba.

Actualmente los campesinos y dueños de las plantaciones de banano utilizan parte de estos residuos para alimentar los animales, las hojas como envoltura de alimentos, y en muchas ocasiones se deja en el campo como aporte de materia orgánica y reciclaje de nutrientes, sin embargo, se considera que solo es necesario el 50 % de los residuos de la cosecha para la conservación del suelo y flora microbiana [21]. Cuando se abandona en el campo más de ese porcentaje se propicia la generación de GEI [22]. Como resultado, se desarrollan investigaciones para el aprovechamiento de los RCB por ser estos la mayor fracción de la planta. El P y el R son los de mayor importancia e investigados para la producción de fibras y bioetanol [23], [24]. Estos residuos presentan alta humedad, por encima del 90 %, y una relación carbono nitrógeno (C/N) alrededor de 30 [25], siendo estas características una ventaja para otros procesos como la digestión anaerobia. En adición, este residuo es considerado lignocelulósico dado que está compuesto principalmente por celulosa, hemicelulosa y lignina. La mayor parte de los procesos que utilizan los RCB requieren de pretratamientos para mejorar su biodegradabilidad a través de la solubilización de la hemicelulosa principalmente. A nivel laboratorio y piloto se pretratan con hidrolisis enzimática, ácida, básica, procesos mecánicos como la extrusión, y otros pretratamientos térmicos utilizados a nivel comercial como la explosión con

vapor (SE, por sus siglas en inglés *Steam Explosion*). Este último ha sido ampliamente estudiado como pretratamiento de biomasa lignocelulósicas. El SE posee diversas características ambientales como bajo consumo de energía, menor inversión de capital, bajo o nulo uso de químicos y alta recuperación de azúcares [26], [27]. Por estos distintivos se seleccionó como el pretratamiento en este estudio.

El proceso de digestión anaeróbica que desde hace años es conocido y utilizado principalmente en el sector rural, hoy en día se aplica a escala industrial, no solo para el manejo de biomasa residual, sino que se ha convertido en una fuente de generación de energía renovable, considerándose el biogás como biocombustible de segunda generación y con propiedades similares a las del GN cuando se purifica a biometano [28].

Los procesos de DA pueden mejorarse cuando los sustratos se combinan dependiendo de sus características físicas, químicas y su disponibilidad. En este sentido, es necesario investigar las peculiaridades del proceso cuando se aplica a nuevos sustratos o mezcla de sustratos debido a que gran parte de su desarrollo está condicionado al sustrato digerido.

Existe poca literatura científica sobre la influencia del pretratamiento de SE en la composición química de R y P frescos y el uso de este tipo de pretratamiento para mejorar la producción de biogás a partir de RCB solo se ha evaluado en un estudio [26]. Además, la codigestión anaeróbica (CoDA) de RCB y FORSU no se ha estudiado antes, a pesar de las ventajas que pueden existir en aquellos municipios o lugares con alta densidad de cultivo de banano.

De esta forma, considerando las propiedades (contenido de humedad, carbono y nitrógeno, disponibilidad y existencia) de la FORSU y los RCB el objetivo de este proyecto fue evaluar la CoDA de la FORSU y RCB frescos para la producción de metano, estudiando al mismo tiempo la SE como pretratamiento para aumentar la biodegradabilidad de los RCB con el fin de definir los aspectos técnico económicos de una planta de biogás rural para su posible implementación en zonas no interconectadas (ZNI) en Colombia.

1 Objetivos

1.1 Objetivo general

El **objetivo general** de esta investigación fue *Evaluar el proceso de codigestión anaeróbica de la fracción orgánica de residuos sólidos urbanos y residuos de cosecha de plátano pretratados con explosión con vapor para la producción de biogás.*

1.2 Objetivos específicos

Para el cumplimiento de este objetivo y teniendo en cuenta los recursos físicos y monetarios se propuso los siguientes **objetivos específicos**:

- Caracterizar las biomásas de interés y su potencial metanogénico.
- Determinar las condiciones de operación de la codigestión anaeróbica para la producción de biogás.
- Evaluar la factibilidad técnico económica de una planta de biogás.

2 Generalidades

2.1 La biomasa

Hoy en día el término biomasa se utiliza para hacer referencia a la materia orgánica que se originó en un proceso biológico espontáneo o inducido donde la energía solar absorbida se transforma en energía química formando glucosa que da origen a almidones, celulosa, hemicelulosa y lignina durante el proceso de fotosíntesis y que es susceptible de ser utilizada como fuente de energía renovable [29]. Por ende, cuando la biomasa se utiliza en procesos térmicos, químicos o biológicos los enlaces entre las moléculas adyacentes de carbono, hidrógeno y oxígeno se rompen liberando la energía química almacenada como energía térmica y eléctrica [3], [30].

La leña, los cultivos agrícolas, cultivos energéticos, desechos agrícolas, residuos municipales orgánicos, residuos pecuarios, residuos forestales e industriales orgánicos se denominan biomasa. La leña es la fuente más antigua de calor utilizada por la humanidad. Se resalta que actualmente sigue siendo parte de la tradición de muchos hogares por el acceso a este energético y los sabores característicos que le proporciona a la comida. En Colombia cerca del 11% (~1.6 M) de los hogares tienen como energético principal la leña, siendo el consumo por hogar de aproximadamente 10.1 kg/día [31], [32].

2.1.1 Clasificación de la biomasa

La biomasa de acuerdo a su uso puede clasificarse en biomasa tradicional y moderna [3]. También puede dividirse en biomasa lignocelulósica, amilácea, azucarada y oleaginosa teniendo en cuenta su composición [33]. Dependiendo del sector de procedencia se tiene biomasa forestal, agrícola, pecuaria, industrial y municipal. Finalmente, de acuerdo a su origen se habla de biomasa natural, residual y cultivos energéticos [34] (ver Figura 2-1).

- Biomasa por su uso

La biomasa tradicional es utilizada para la calefacción y cocción en estufas de leña principalmente. La biomasa moderna es utilizada en la producción de combustibles para transporte cuando su uso es netamente energético.

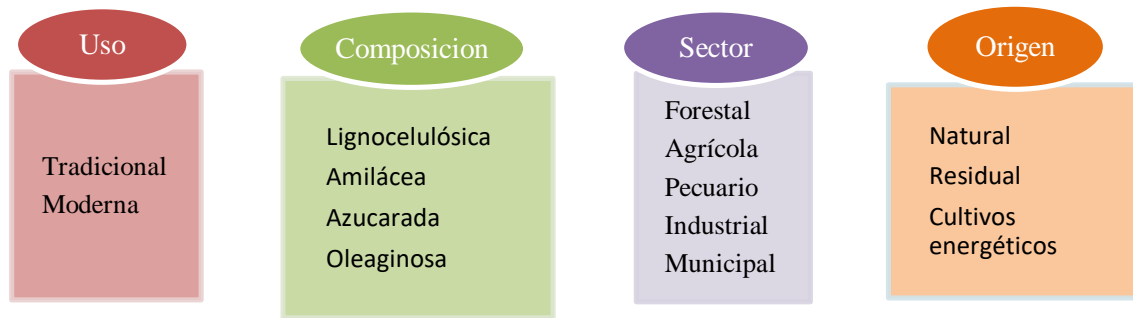


Figura 2-1. Clasificación de la biomasa de acuerdo a su uso, composición, sector y origen.

- **Biomasa por su composición**

La biomasa lignocelulósica está compuesta principalmente por celulosa, hemicelulosa y lignina (ejemplo: residuos herbáceos). La biomasa amilácea la conforman polisacáridos como almidón (ejemplo: cereales). Los componentes principales de la biomasa azucarada son azúcares como glucosa y sacarosa (ejemplo: tallo de la caña de azúcar). Por último, la biomasa oleaginosa tiene un alto contenido de lípidos (ejemplo: pepas de girasol).

- **Biomasa por su sector de procedencia**

Se clasifica dependiendo de la fuente de generación, de esta forma existe la biomasa de residuos forestales, residuos agrícolas, pecuaria, industrial y municipal. En este último grupo se encuentra la Fracción Orgánica de Residuos Sólidos Urbanos (FORSU) y los lodos de plantas de tratamiento de agua residual (lodos de PTAR).

- **Biomasa por su origen**

La biomasa natural corresponde a los residuos generados dentro de los ecosistemas naturales sin la intervención humana. Por su parte la biomasa residual (BR) corresponde a los subproductos orgánicos derivados de plantas, animales, industrias asociados a toda actividad antropológica. Los cultivos energéticos son biomasa procedentes de cultivos dedicados para la producción de bioenergía.

2.1.2 Composición química de la biomasa

La célula es la unidad estructural de los organismos vivos. La célula vegetal está conformada por una pared celular que es una matriz extracelular que encierra cada célula de una planta, hongo, alga,

o bacteria brindando soporte estructural y protección a las tensiones mecánicas y térmicas [35]. La conforman una pared primaria, pared secundaria y una laminilla media, estas a su vez están compuestas por celulosa, hemicelulosa, lignina (ver Figura 2-2), entre otros compuestos menores. Por ende, la biomasa está compuesta por celulosa, hemicelulosa, lignina, proteínas, lípidos, cenizas, y demás materia inorgánica no extraíble y compuestos extraíbles no estructurales. A continuación, se describen los principales compuestos de la biomasa.

- Celulosa

La celulosa ($C_6H_{10}O_5$)_n es un polisacárido formado por unidades de D-glucosa unidas por enlaces glicosídicos que forman cadenas lineales y brindan soporte estructural. Las moléculas de glucosa pueden formar microfibras que se agrupan para formar fibras de celulosa, la rectitud de la cadena está determinado por los enlaces de hidrógeno, sin embargo estos enlaces entre cadenas pueden generar zonas amorfas o cristalinas [27]. La celulosa es el compuesto mayoritario de la pared celular, entre 40-50%.

- Hemicelulosa

La hemicelulosa es un polisacárido no fibrilar formado por hexosas como glucosa, manosa, galactosa, pentosas como xilosa, arabinosa y ácidos urónicos unidos por enlaces glicosídicos. Su compuesto mayoritario son las xilosas y arabinosas dependiendo el tipo de biomasa. La hemicelulosa recubre la superficie de las fibras de celulosa y es la más sensible a ataques termoquímicos, por esta razón cuando la biomasa es pretratada y la hemicelulosa se elimina, la digestibilidad de la celulosa aumenta [27] [35]. Este polímero corresponde al 20-40% de la pared celular.

- Lignina

La lignina es un polímero aromático amorfo insoluble rígido formado por la unión de ácidos, alcoholes fenilpropílicos y diferentes azúcares. Es considerado un compuesto recalcitrante debido a que da rigidez, impermeabilidad y resistencia a la pared celular evitando el ataque enzimático. Este polímero es considerado el pegante que une los componentes de la biomasa, su estrecha asociación con las microfibrillas de la celulosa evitan su degradación efectiva, por esta razón el contenido de lignina limita la hidrólisis enzimática y microbiana de la biomasa [27]. La pared celular se compone de este polímero entre 20-30%.

En específico las propiedades de la biomasa están dadas por la cristalinidad, el grado de polimerización, porosidad, y resistencia de la fibra [27]. Así mismo, su composición cambia dependiendo del tipo, especie y fuente de la biomasa.

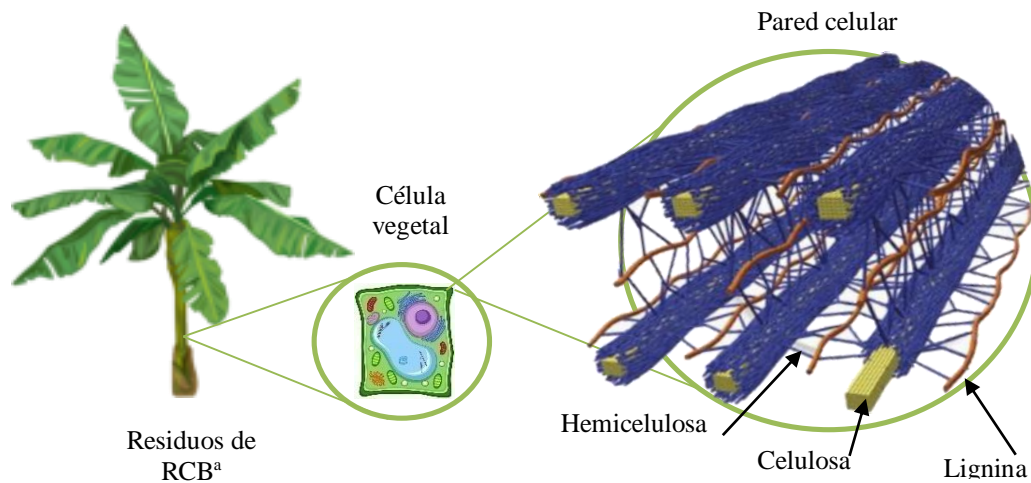


Figura 2-2. Componentes principales de la pared celular de una planta.^a residuos de cosecha de banano (pseudotallo y raquis).

Fuente: adaptado de [36]

2.1.3 Procesos de conversión energética de la biomasa

La biomasa puede transformarse de acuerdo a su contenido de humedad (ver Figura 2-3). Este parámetro es fundamental para la selección de la biomasa de conversión porque influye sobre los costos del proceso y el tiempo.

La biomasa con contenido de humedad inferior al 60 % se considera biomasa seca y es destinada principalmente a la conversión termoquímica como los procesos de combustión, pirólisis, y gasificación. Por el contrario, la biomasa húmeda (>60 %) tiene como fin la conversión química y bioquímica. En la conversión química se lleva a cabo la transesterificación para la producción de biodiesel. En la conversión bioquímica se transforma a metano e hidrógeno mediante fermentación anaerobia o puede realizarse una fermentación alcohólica para la producción de etanol.

En esta investigación los sustratos utilizados, la FORSU y los RCB presentan un porcentaje de humedad por encima del 80 %, por esta razón los primeros procesos considerados fueron los químicos y bioquímicos. La digestión anaeróbica se seleccionó teniendo en cuenta la composición de la biomasa o sustratos y la carencia de información sobre la digestión del material lignocelulósico como RCB.

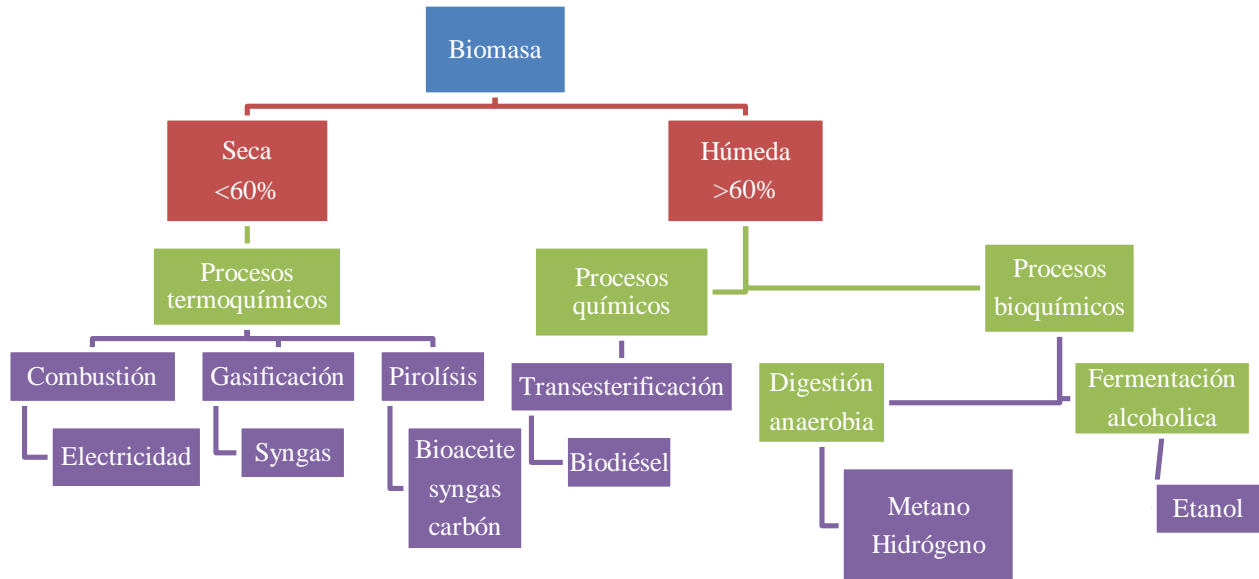


Figura 2-3. Procesos de conversión de energía considerando el contenido de humedad en la biomasa

Fuente: Adaptado de [3]

2.1.4 Residuos de cosecha de plátano o banano

El plátano o banano es un cultivo importante a nivel mundial y nacional. Se cultiva en regiones tropicales y subtropicales. África, América Latina y el Caribe son los principales productores. Colombia es uno de los principales productores en América Latina, durante el año 2017 la producción nacional fue de 6.2 Mt [15]. Existen diversos géneros de banano como *Musa acuminata*, *Musa babisiana* e híbridos como *Musa paradisiaca*. Las variedades de banano o plátano más conocidas son Dwarf Cavendish, Manzano, Gros Michel, Grand Nain, Lacatan, Lady's Finger, Valery, Macho, entre otras. En algunas partes del mundo se conoce el banano como el fruto que se come crudo y el plátano como el fruto que se cocina. Durante este trabajo se habla indistintamente de estos términos y los datos presentados corresponden al conjunto de banano y plátano, que desde ahora será denominado banano. La vida útil de la planta de banano se termina una vez da el fruto, lo que se consigue en alrededor de 9 meses. Después de su ciclo productivo los desechos de cosecha quedan disponibles y sin ningún uso. Cada planta de banano (ver Figura 2-4) genera residuos discriminados así: cáscaras (4.4 %), bellota (0.5 %), P (73 %), R (2.6 %), hojas (8.5 %), y fruto de rechazo (2 %) [21]. El P y el R son residuos lignocelulósicos y con menor uso.

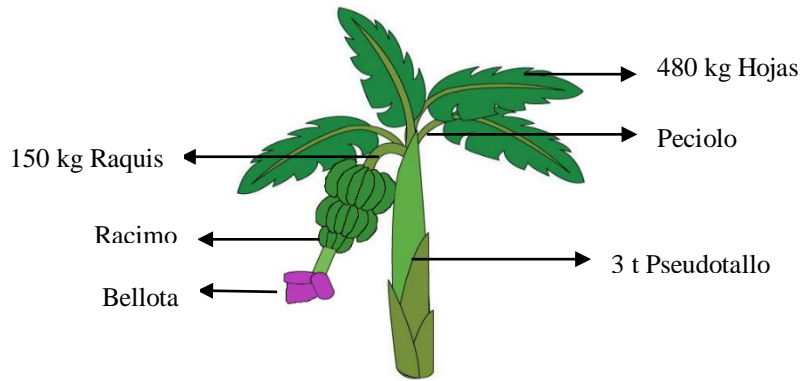


Figura 2-4. Componentes de una planta de banano y residuos de cosecha generados por tonelada de banano.

Se considera que máximo el 50 % de los residuos deben dejarse en el campo como enmienda del suelo, dejando aprovechable el otro 50 % [21]. Actualmente el 7 % se utiliza para alimentación animal, 5 % para fertilización y 1 % en industrialización como en extracción de fibra textil, bioplásticos, y nutrición humana (ver Figura 2-5) [37]. Durante los últimos años se ha estudiado la biodegradabilidad de P y R debido a que presentan alta humedad y relación C/N adecuada para los procesos de DA. Existen reportes de rendimientos de producción de biogás cercanos a 9 L/kgST [38]. Estos rendimientos frente a otras biomásas como la FORSU son bajas, por esta razón se estudian codigestiones y pretratamientos químicos o térmicos como la explosión con vapor para aumentar la producción de biogás y metano [39]. Los usos bioenergéticos del P y el R se centran principalmente en estudios experimentales para la producción de bioetanol.

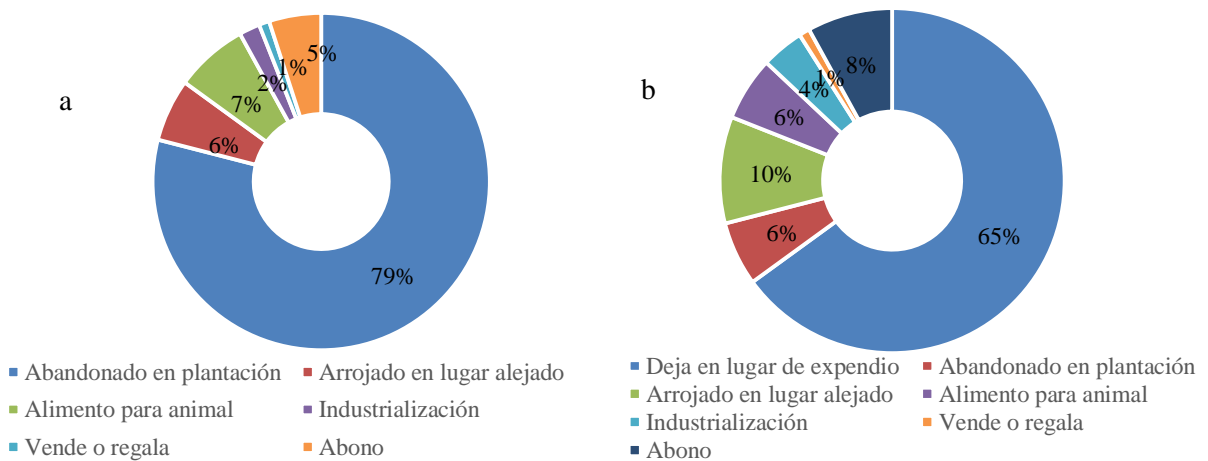


Figura 2-5. Destinos de los residuos de pseudotallo (a) y raquis (b) después de la cosecha de banano en departamentos con mediana densidad de cultivo como Caldas.

Fuente: Adaptado de [37]

2.1.5 Fracción orgánica de residuos sólidos urbanos

La Fracción orgánica de residuos sólidos urbanos conforma el grupo de los residuos sólidos urbanos (RSU). Los RSU corresponden a todo material procedente de un proceso de extracción, transformación o utilización que es carente de valor para su propietario. Son generados en el sector domiciliario, comercio, oficinas, y servicios, y todo material clasificado como no peligroso como residuos de comida y jardín, productos de papel, cartón, plástico, vidrio, textiles, madera, productos metálicos, cerámicos, escombros de obras menores, entre otros, siendo la mayor participación la de los desechos orgánicos. Estos residuos en general son los que generan calor durante la combustión en procesos de incineración y generación eléctrica (WTE, por sus siglas en inglés *Waste to Energy*). Los RSU conforman un grupo más grande denominado residuos sólidos en el cual se encuentran los residuos derivados de las actividades agropecuarias, mineras, industriales, y hospitalarios [40].

La estructura de valorización de los RSU (ver Figura 2-6) es diversa. Como objeto de este estudio nos centramos en la de la FORSU. En Colombia la FORSU representa alrededor del 55% de los RSU [41]. Esta puede utilizarse para compostaje, alimentación de animales, y su aprovechamiento energético a través de la DA.

En Colombia la generación per cápita de RSU fue en promedio 0.62 kg/hab/día, siendo el 87% proveniente de residuos sólidos domiciliarios [40] donde alrededor del 55% corresponde a materia orgánica, principales responsables de la generación de GEI (61% de los GEI) cuando son enterrados en rellenos sanitarios [41]. La mayor parte de los proyectos desarrollados en Colombia han estado enfocados al tratamiento y aprovechamiento de los residuos agroindustriales, dejando a un lado la FORSU. Esta última, se menciona en el artículo 18 de la Ley 1715 de 2014, donde se describe la energía de residuos, y se considera como Fuente No Convencional de Energía Renovable (FNCER) el contenido energético de los residuos sólidos que no sean susceptible de reutilización y reciclaje [42]. Lo anterior, sumado a los Planes de Gestión Integral de Residuos Sólidos (PGIRS) que deben tener todos los municipios y el CONPES 3874 [41], son base para la implementación de modelos de digestión anaeróbica con la FORSU.

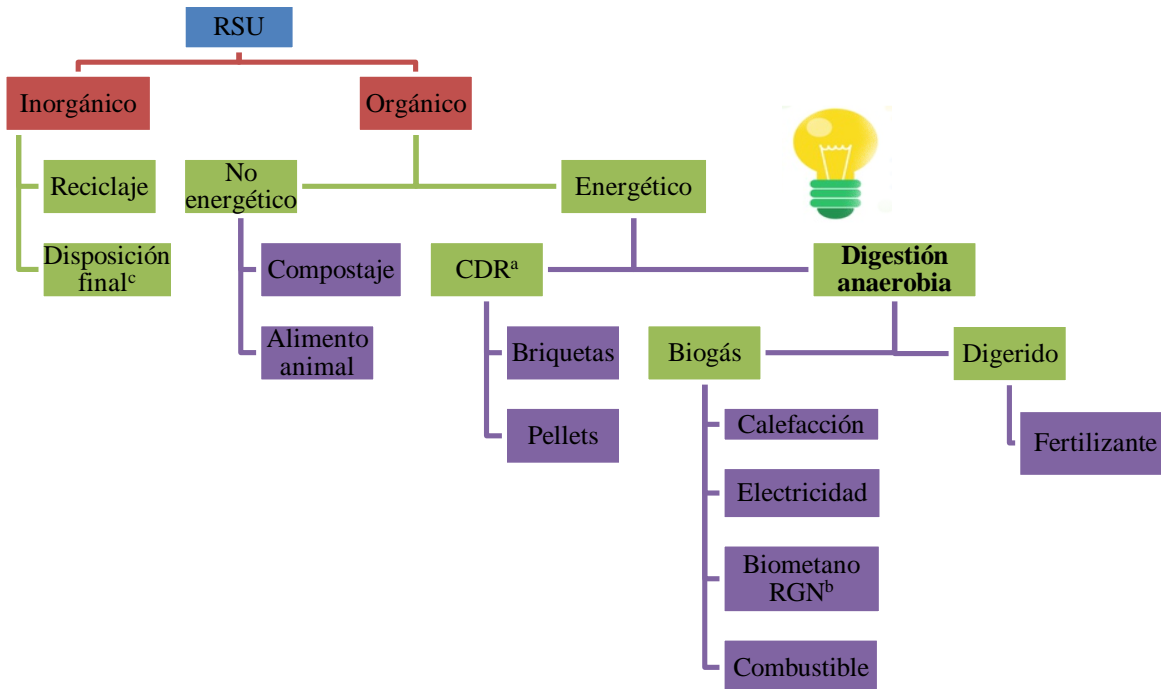


Figura 2-6. Valorización de los residuos sólidos urbanos –RSU^a combustibles derivados de residuos, ^bred de gas natural, ^cdisposición final en rellenos sanitarios modernos que controlen las emisiones de metano a la atmósfera.

2.1.6 Lodos de plantas de tratamiento de agua residual

Los lodos son producto del tratamiento de las aguas residuales en una Planta de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR), se producen por los procesos físicos, químicos y biológicos que sufre el material que llega a la planta. Su composición es muy variada y están formados por sustancias nocivas para la salud, motivo por el cual se debe utilizar todos los elementos de protección durante su manipulación. A diferencia de los lodos de plantas potabilizadoras de agua, los lodos de PTAR contienen alta cantidad de materia orgánica, como resultado una alta concentración de microorganismos [43].

Los lodos son fuente de generación de biogás. Debido a su continuo contacto con diversas materias orgánicas, estos lodos dan origen a diferentes comunidades microbianas, entre ellas, las necesarias para llevar a cabo procesos de hidrólisis, acidogénesis, acetanogénesis y metanogénesis durante la DA. En Colombia existen lodos para la producción de biogás como el utilizado en la PTAR EMCALI, Salitre y Alpina.

Existen diferentes tipos de lodos dependiendo el tipo de tratamiento al que ha sido sometido, entre estos se tiene: el lodo crudo que no se ha tratado ni estabilizado; lodos primarios producto de tratamientos físicos como sedimentación de sólidos; lodos activos resultado de tratamientos biológicos, tiene la particularidad que forman flóculos que contienen microorganismos; lodos secundarios que resultan del tratamiento biológico secundario con lodos activados, filtros rociadores y biodiscos; por último, los lodos digeridos obtenidos del proceso de DA [44].

Por lo anterior, los lodos de PTAR se consideran un buen inóculo cuando no se tiene un inóculo especializado para el sustrato a digerir. En este estudio fueron utilizados dos lodos de PTAR como inóculo.

2.2 Pretratamientos de la biomasa

La biomasa de acuerdo al tipo es acondicionada previamente a su conversión. Esto se hace con el fin de facilitar la disponibilidad de carbohidratos, proteínas y lípidos para enzimas y microorganismos. A través del pretratamiento se pretende romper la pared celular de la biomasa con la alteración de la lignina y la estructura cristalina para facilitar la hidrólisis de la celulosa (ver Figura 2-7). A continuación, se describen los pretratamientos más comunes para la biomasa lignocelulósica, existe una variedad de pretratamientos que pueden consultarse en [45].

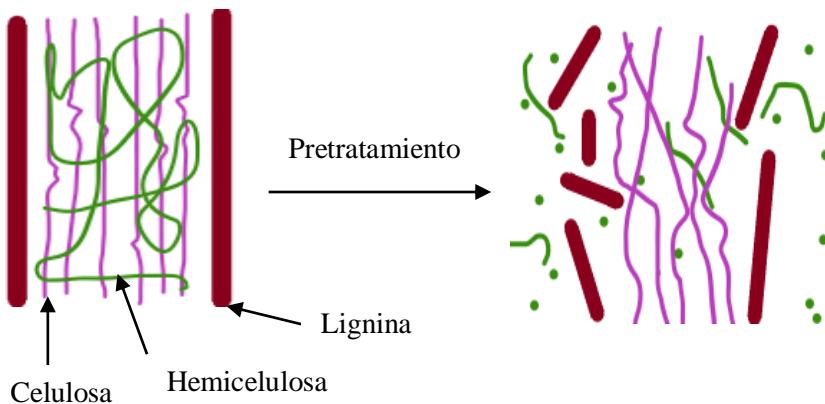


Figura 2-7. Efecto del pretratamiento en biomasa lignocelulósica.

Algunos factores que determinan la efectividad del pretratamiento son: altos rendimiento de los cultivos, fracción sólida altamente digestible, bajo o nula degradación del azúcar, baja concentración

de compuestos tóxicos, no tener como requisito la reducción de tamaño, operación en reactores de tamaño razonable y costo moderado, no generación de residuos tras el pretratamiento, efectividad a bajo contenido de humedad, obtención de alta concentración de azúcar, recuperación de la lignina, requisitos mínimos de calor y energía [45].

2.2.1 Físicos

Existen diferentes tratamientos físicos como el lavado de la biomasa que permite remover suciedad y/o minerales que puedan afectar el proceso de digestión. Por otro lado, la reducción de tamaño de partícula mediante molienda, cribado, chipeado o cualquier trituración mecánica es empleado para aumentar el área superficial y reducir el grado de polimerización [46]. En procesos de DA el cribado y la selección de la biomasa que ingresa al digestor afecta su funcionamiento. Por ejemplo, en una muestra de FORSU es importante separar huesos grandes y duros que no son susceptibles de degradar.

2.2.2 Químicos

Consiste básicamente en tratar el sustrato con compuestos químicos que funcionan como catalizadores. Los tratamientos ácidos (ácido sulfúrico) se realizan a temperaturas entre 120-180°C durante minutos a horas, el efecto se da sobre la hemicelulosa y la lignina principalmente. Se pueden realizar con alta concentración de ácido o ácidos diluidos. Los tratamientos básicos (NaOH, KOH, Ca(OH)₂) se pueden realizar a temperatura ambiente. El efecto del pretratamiento alcalino sobre la biomasa es más eficaz que el ácido, se ha registrado mayor digestibilidad de la celulosa y solubilización de lignina [47].

2.2.3 Fisicoquímico y térmicos

- Pasteurización

Existen diferentes tipos de pasteurización, depende principalmente de la temperatura y el tiempo. En la digestión anaerobia es común la aplicación de la pasteurización lenta, esta consiste en someter la biomasa a temperaturas entre 60-70 °C durante minutos a 1 hora con el fin de realizar una higienización de la biomasa. De acuerdo con el tipo de biomasa este pretratamiento puede

incrementar o disminuir la producción de biogás, y en otros casos no se evidencia ningún cambio en el rendimiento de biogás [48].

- Agua líquida caliente

LHW (por sus siglas en inglés *Liquid Hot Water*) es un proceso en el que la biomasa es sometida a altas presiones para mantener el agua en estado líquido a temperaturas medias que oscilan entre 160-240 °C durante segundos a horas y un pH de 4-7 con el fin de alterar la estructura de la lignocelulosa. En el pretratamiento la mayor parte de la hemicelulosa se solubiliza dejando la celulosa más accesible, por su parte la lignina y la celulosa no se ven afectadas y permanecen en el sólido principalmente. No requiere de catalizador ni compuestos químicos [45].

- Explosión con vapor

Durante el SE (por sus siglas en inglés *Steam Explosion*) la biomasa es sometida a altas temperaturas (160-280°C) ocasionando un incremento notable en la presión durante un corto tiempo (de segundos a minutos) mediante el uso de vapor de agua saturado, seguido de una disminución repentina de la presión con el fin de generar una descompresión explosiva que conduce a la desintegración de los componentes estructurales de la biomasa, incrementando su biodegradabilidad. La SE es una técnica principalmente utilizada en la industria papelera. En el campo de la DA esta técnica ha sido aplicada a materiales como eucalipto, caña de azúcar, cáscara de café y rastrojo de maíz principalmente obteniendo en todos los casos una tasa de producción de biogás alta [49]–[51]. En RCB se ha evaluado teniendo mejoras de hasta el 12.7 % en la producción de biogás [26]. Esta técnica requiere baja demanda de energía y sin la necesidad de productos químicos, estas características hacen del SE un pretratamiento ambientalmente amigable.

2.2.4 Biológico

En el proceso biológico son utilizados hongos y/o bacterias capaces de degradar la lignina y hemicelulosa. Durante estos pretratamientos los hongos y bacterias pueden degradar parte de la celulosa, sin embargo, es un pretratamiento atractivo ya que no utiliza químicos y no requiere de mucha energía. Los hongos más utilizados son los marrones y blancos, los cuales degradan la lignina, la hemicelulosa y solo una pequeña fracción de la celulosa [47].

2.3 La digestión anaerobia

La degradación de la materia orgánica en ausencia de oxígeno se lleva a cabo de forma natural en lagunas, pantanos, vertederos, fondo de ríos y océanos, y en el tracto digestivo de animales, principalmente de bovinos [52]. Durante el siglo XVII, Jan Baptista Van Helmont determinó que los gases inflamables podían originarse a partir de la descomposición de la materia orgánica. Por su parte, Alessandro Volta concluyó que existía una correlación directa entre la cantidad de materia orgánica en descomposición y el volumen producido de gas inflamable [53]. Estas comunicaciones fueron las primeras referencias científicas sobre el tema del biogás, desde entonces se ha investigado y aplicado en todo el mundo.

La DA es un proceso de fermentación en ausencia de oxígeno, durante el cual los microorganismos presentes en la biomasa actúan en sintrofia (se colaboran entre sí para tener mayor asimilación de energía) para transformar el material orgánico en una mezcla combustible de gases conocida como biogás. La composición de este gas es 60- 70 % de CH_4 , 30-45 % de CO_2 , 1- 2 % de H_2S y trazas de amoníaco, monóxido de carbono, nitrógeno y oxígeno dependiendo el sustrato en digestión [54]. El biogás normalmente se somete a procesos de refinación donde se elimina el H_2S y el CO_2 presente con fines de obtener básicamente metano, cuyo uso es igual al del GN tanto en el sector transporte como en el residencial.

Como producto secundario del proceso se obtiene el digerido o biol, considerado una fuente alta en nutrientes, pudiendo usarse como fertilizante o enmienda orgánica en suelos [55].

2.3.1 Etapas del proceso

La digestión anaeróbica se divide en tres o cuatro etapas dependiendo el autor. A continuación, se describen cuatro etapas para detallar el proceso. Estas son: hidrólisis (1), acidogénesis (2), acetanogénesis (3), y metanogénesis (4). En la Figura 2-8

Figura 2-8 se muestran las fases que corresponde a cada etapa con el número asignado.

- *Hidrólisis*

El proceso comienza con la hidrólisis, los compuestos complejos como las proteínas, celulosa y lípidos son degradados a moléculas simples como aminoácidos, azúcares, y ácidos grasos de cadena

larga por medio de las exoenzimas, las cuales tienen actividad hidrolítica y son producidas y secretadas por las bacterias hidrolíticas. Esta etapa está condicionada por el tipo de sustrato, por tanto, sustratos con altas concentraciones de carbohidratos tardan menos en la fase hidrolítica que sustratos con alta concentración de lípidos y/o proteínas. La lignina se degrada lenta e incompletamente [55]. Por lo anterior, sustratos difícilmente biodegradables como los lignocelulósicos se recomienda ser sometidos a pretratamientos agresivos como hidrólisis ácida, básica o explosión de vapor, de forma que las bacterias hidrolíticas sean capaces de transformarlos en compuestos simples que serán el alimento en las etapas sucesivas.

- *Acidogénesis*

El proceso sigue con la fase de acidogénesis, las moléculas solubles formadas en la hidrólisis son utilizadas para producir ácidos orgánicos volátiles de cadena corta como ácido butírico, y propiónico también se produce ácido acético, alcoholes como etanol y gases como CO₂ e H₂. Adicionalmente se producen ácidos orgánicos volátiles y alcoholes como el ácido láctico y el etanol respectivamente. Las poblaciones microbianas involucradas en esta etapa son anaeróbicas facultativas [55].

- *Acetanogénesis o etapa fermentativa*

Después continúa la fase de acetanogénesis, los productos de la acidogénesis son utilizados por la población acetogénica para producir compuestos más sencillos como ácido acético, hidrógeno y dióxido de carbono, siendo estos tres los principales precursores del metano, por ser los únicos compuestos metabolizados por las bacterias metanogénicas. Las concentraciones de H₂ durante esta etapa debe ser baja, razón por la cual se debe controlar la acumulación de ácidos volátiles por ser estos sustratos para las acetagénicas productoras de H₂ [56]. Las reacciones que ocurren en esta fase son endotérmicas (Ver Tabla 2-1).

Tabla 2-1 Reacciones acetanogénicas

Compuesto químico	Reacción química
Dióxido de carbono/ hidrógeno	$2\text{CO}_2 + 4\text{H}_2 \leftrightarrow \text{CH}_3\text{COOH} + 2\text{H}_2\text{O}$
Ácido propiónico	$\text{CH}_3(\text{CH}_2)\text{COOH} + 2\text{H}_2\text{O} \leftrightarrow \text{CH}_3\text{COOH} + \text{CO}_2 + 3\text{H}_2$
Ácido butírico	$\text{CH}_3(\text{CH}_2)_2\text{COOH} + 2\text{H}_2\text{O} \leftrightarrow 2\text{CH}_3\text{COOH} + 2\text{H}_2$
Ácido láctico	$\text{CH}_3\text{CHOHCOOH} + 2\text{H}_2\text{O} \leftrightarrow \text{CH}_3\text{COOH} + \text{HCO}_3 + \text{H}^+ + 2\text{H}_2$

Fuente: adaptado de [57]

- *Metanogénesis*

Durante la última etapa los microorganismos metanogénicos o arqueas producen metano a partir del ácido acético o H_2 y CO_2 . Estas bacterias son estrictamente anaerobias, por lo tanto, bajas concentraciones de oxígeno inhiben el proceso. El metano y el CO_2 se separan de la fase acuosa y se liberan en forma gaseosa. El metano proveniente de las bacterias metanogénicas acetoclásticas representa el 70% de la producción en el digestor y es producido a partir del acetato. Por su parte, las bacterias hidrogenotróficas producen metano a partir del H_2 y el CO_2 y representa el 30% [58]. A diferencia de la etapa acetanogénica, las reacciones que ocurren son exotérmicas (Ver Tabla 2-2).

Tabla 2-2. Reacciones metanogénicas

Reacción química	ΔG (KJ/mol)
$4H_2 + HCO_3 + H^+ \rightarrow CH_4 + 3H_2O$	-134.4
$CO_2 + 4H_2 \rightarrow CH_4 + 2H_2O$	-131.0
$CH_3COO + H_2O \rightarrow CH_4 + H_2O$	-30.9

Fuente: adaptado de [57]

Paralelamente a las 4 fases mencionadas, ocurren otras dos que están condicionadas al contenido de azufre y nitrógeno en la biomasa. Estas etapas consisten en la reducción de sulfatos y nitratos para producir sulfuro de hidrógeno, amonio y amoniaco respectivamente. Ambos productos en altas concentraciones representan inhibición de la DA [58].

2.3.2 Microbiología del proceso

El proceso de DA es bien conocido por ser una sinergia de varios grupos de microorganismos. Es decir, la degradación no podría llevarse a cabo de forma independiente por un solo grupo de bacterias. Del mismo modo que la DA es separada en cuatro etapas, las bacterias involucradas se separan en cuatro tipos (Ver Figura 2-9). En primer lugar, están las bacterias hidrolíticas con varios géneros como *Clostridium*, *Peptococcus*, *Micrococcus*, *Bacillus*, entre otros, están usan enzimas exocelulares permitiendo atacar moléculas grandes. Por otro lado, están presentes las bacterias acidogénicas como los géneros *Bacteroides*, *Ruminococcus*, *Butyribacterium*, *Lactobacillus*, *Streptococcus*, *Escherichia*, entre otros; estas bacterias son facultativas y consumen trazas de oxígeno para mantener condiciones estrictamente anaerobias en el digestor. El tercer grupo son las bacterias acetogénicas donde están presentes dos tipos de bacterias.

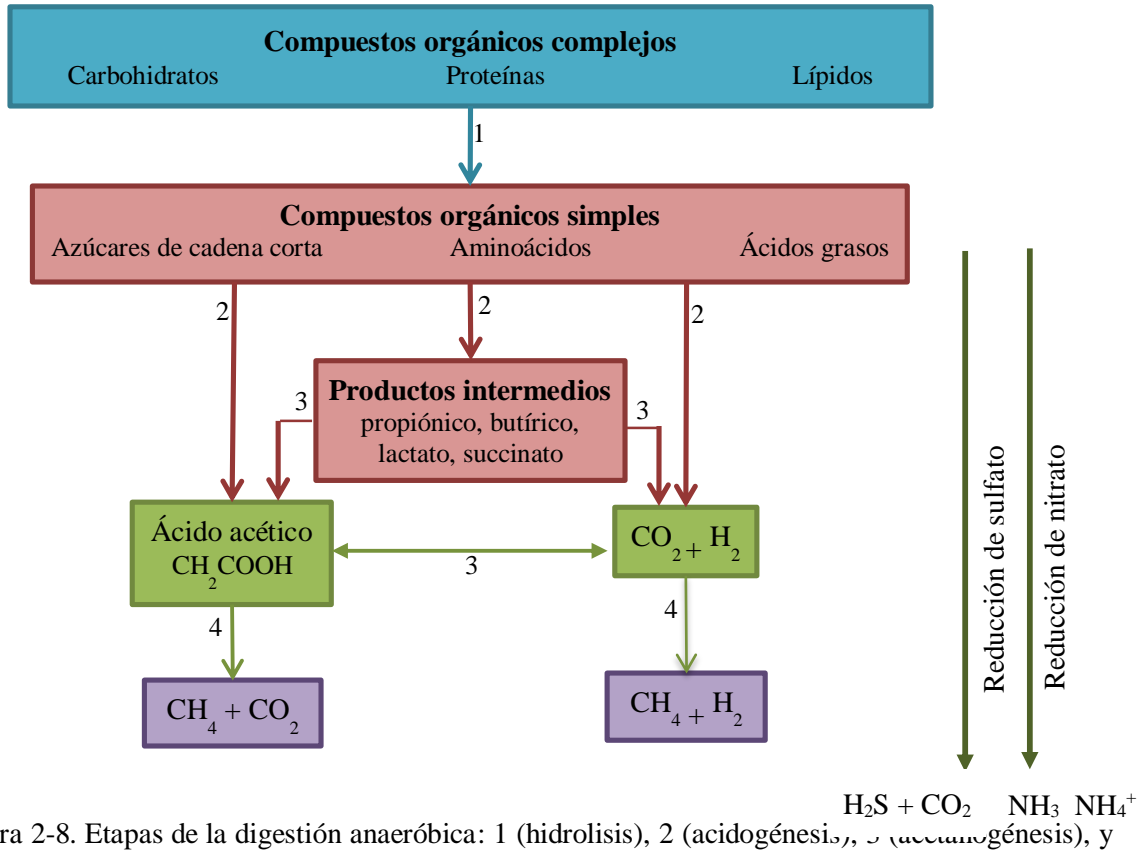


Figura 2-8. Etapas de la digestión anaeróbica: 1 (hidrolisis), 2 (acidogénesis), 3 (acetilación), y 4 (metanogénesis).

Fuente: adaptado de [59]

Las bacterias acetogénicas productoras de hidrógeno (OHPA por su siglas en inglés *Obligate Hydrogen Producing Bacteria*), su principal característica es que solo crecen en ambientes con baja presión parcial de H_2 , razón por la cual mantienen una relación simbiótica con las bacterias consumidoras de H_2 (metanógenos y sulforreductores), *Syntrophomonas wolfei* y *Syntrophobacter wolinii* son algunos géneros [60]; el segundo grupo son las bacterias homoacetogénicas, a diferencia de las OHPA son estrictamente anaerobias, algunos géneros identificados son *Acetobacterium*, *Acetoanaerobium*, *Acetogenium* y *Pelobacter* [60]. Finalmente, el grupo de las bacterias metanogénicas perteneciente a las *Archaea*, estas son estrictamente anaerobias y pueden inhibirse con concentraciones de O_2 disuelto de 0.01 ppm. Existen dos tipos de arqueas, las arqueas metanogénicas acetoclásticas que producen CH_4 y CO_2 a partir de acetato y las arqueas metanogénicas hidrogenotróficas que producen metano a partir de H_2 y CO_2 [60]. Se distinguen otros dos grupos, las bacterias sulforreductoras y nitrificantes. Las bacterias sulforreductoras compiten

con las arqueas metanogénicas hidrogenotróficas por el H₂ para formar H₂S que es tóxico a altas concentraciones tanto para el medio como para la salud del hombre y en los equipos causa corrosión.

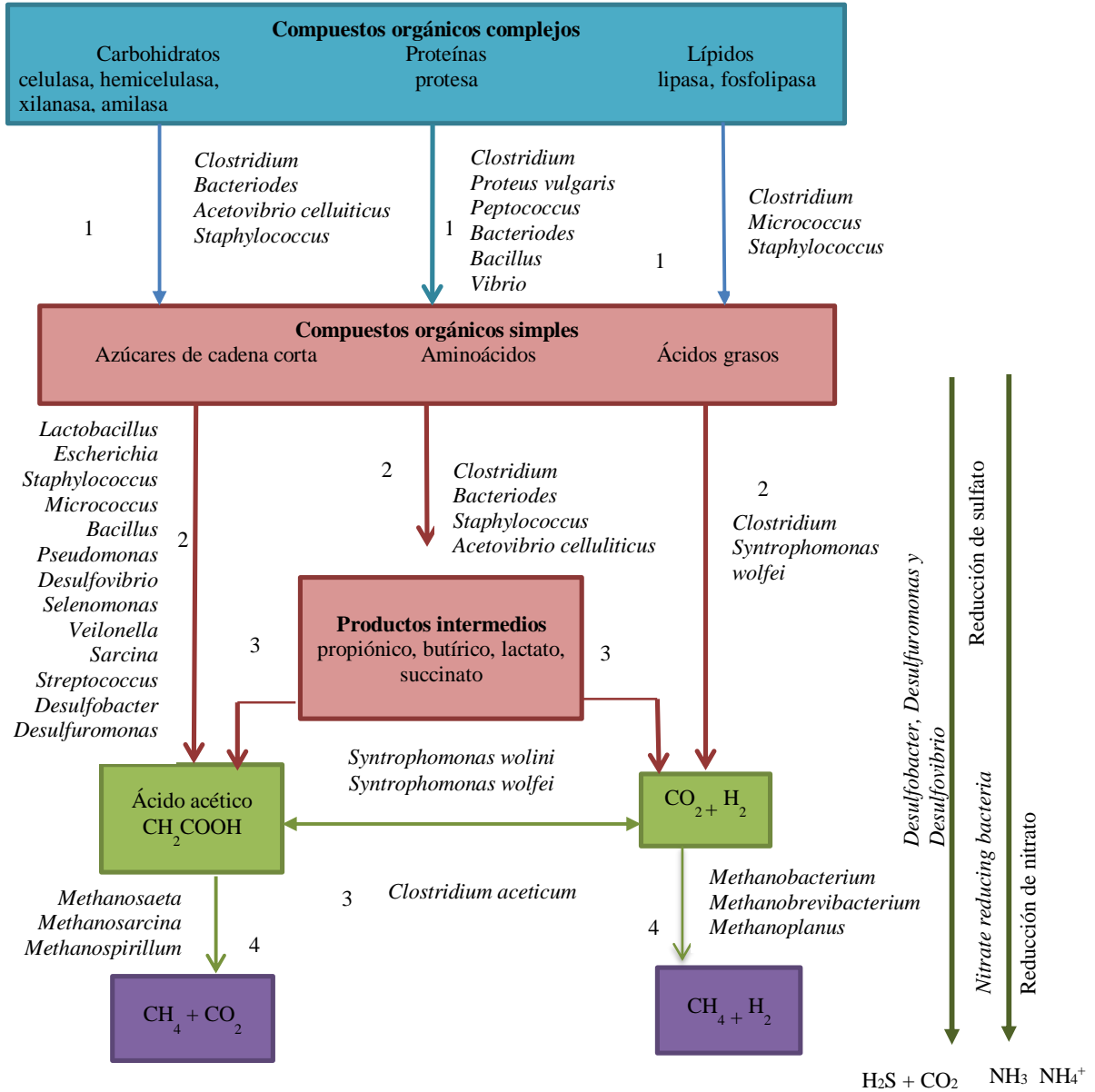


Figura 2-9. Microorganismos y enzimas involucrados en cada fase de la digestión anaerobia. 1 (hidrólisis, bacterias hidrolíticas), 2 (acidogénesis, bacterias acidogénicas), 3 (acetogénesis, bacterias acetogénicas incluidas bacterias productoras de hidrógeno y homoacetogénicas), y 4 (metanogénesis, bacterias metanogénicas incluidas bacterias acetoclásticas e hidrogenotróficas).

Fuente: adaptado de [60]

En cuanto a las bacterias desnitrificantes se produce una desasimilatoria de nitrato a amoníaco (DNRA por sus siglas en inglés *Dissimilatory Nitrate Reduction to Ammonia*), altas concentraciones de amonio pueden inhibir el proceso de DA [61]. También puede considerarse altas concentraciones de amonio cuando en el medio las concentraciones de nitrógeno son muy altas, esto inhibe el adecuado crecimiento microbiano. El amoníaco libre es más inhibitorio que el ion amonio [62].

2.3.3 Parámetros que afectan el proceso

- Parámetros de control

pH: Cada grupo de microorganismos necesita un pH de trabajo diferente. Por ejemplo, las metanogénicas necesitan condiciones de pH en un rango de 6.6 – 7.5, un cambio leve en el pH puede inhibirlas. Cuando la producción de ácidos volátiles es mayor que la velocidad de consumo de las bacterias metanogénicas se produce un cambio en el pH. La concentración de CO₂ y HCO₃⁻-alcalino en la fase gaseosa y en la fase líquida respectivamente, controlan el pH del sistema [63].

Temperatura: La temperatura es una variable que afecta el proceso de digestión anaeróbica. Cuando existen cambios bruscos de temperatura las bacterias metanogénicas se inhiben. La actividad bacteriana tiene lugar entre 4-100 °C. Cuando se trabaja a condiciones termófilas (45- 75 °C), se favorece la cinética de producción de biogás. Sin embargo, a altas temperatura el proceso es más inestable presentándose inhibición por amonio, y acumulación de ácidos grasos volátiles (AGV) [64]. Existen otros casos, en los que el proceso se lleva a cabo a temperatura psicrófila (15-20 °C). En este intervalo la tasa de degradación es muy lenta y requiere de equipos muy grandes. Normalmente en las plantas industriales los digestores operan en un rango mesófilo (30-40 °C). El biogás producido en estas plantas satisface los requerimientos para mantener la temperatura a 37 °C, lo que no sucede en la mayoría de casos cuando se trabaja por encima de 50 °C [64] .

Relación sólidos volátiles de sustrato a sólidos volátiles de inóculo (sustrato: inóculo): La materia volátil es la fracción de la biomasa susceptible de ser biodegradada, es considerada como el carbono que puede desprenderse de la matriz de la biomasa y después ser utilizado en la formación de metano. La relación de sólidos volátiles de sustrato inóculo con la que se alimenta los reactores influye en la calidad del biogás y en la velocidad de generación. Esta es la razón por la que las biomásas deben

ser caracterizadas detalladamente. En la mayoría de los estudios se trabaja con relaciones de 2:1, 4:1 y 6:1 [55].

- Parámetros operacionales

Tiempo de retención: El tiempo de retención es el tiempo promedio que un sustrato o una mezcla de sustratos permanece en el digestor hasta ser degradado. Depende del tipo de sustrato y el tipo de biodigestor que se esté operando. Para el diseño de un digestor es obligatorio conocer previamente el tiempo de retención. Normalmente se operan a un tiempo de 15-20 días para asegurar la mayor degradación posible de materia orgánica. No obstante, los ensayos *batch* y semi-continuo permiten determinarlo [54]. El tiempo de retención está dividido en tiempo de retención hidráulica (TRH) siendo el tiempo de permanencia de la fracción líquida en el digestor, y el tiempo de retención de sólidos (TRS) que corresponde al tiempo que la fracción orgánica en estado sólido que permanece en el digestor [54]. El uso adecuado de cada término depende de la naturaleza del sustrato y el tipo de digestor.

Carga orgánica volumétrica, COV: Es la cantidad de sustrato que ingresa al digestor en un tiempo determinado. Se expresa como $g_{SV} L_{digestor}^{-1} d^{-1}$, siendo los g_{SV} la cantidad de sustrato introducida al digestor expresada en sólidos volátiles (SV). Este parámetro determina la cantidad de material que las bacterias tienen que descomponer en un determinado TRH [28].

Agitación: El contacto entre el sustrato y las bacterias se consigue a través de una buena agitación. Esto permite una distribución uniforme de las dos partes. Adicionalmente, se evitan gradientes de temperatura en el digestor generando zonas muertas en donde no se está llevando a cabo ninguna reacción o a una tasa de producción de metano muy baja [64]. Por el contrario, agitaciones altas rompen los gránulos de bacterias y ocasionan que a la salida del digestor haya material que aún no ha sido degradado.

Tipo de digestor: El tipo de digestor utilizado depende básicamente de la naturaleza del sustrato, la inversión y las condiciones ambientales. Algunos puntos importantes para la selección del sistema del biodigestor son las tecnologías de sistemas de alimentación, temperatura del reactor, número de fases, y sistema de agitación (Ver Figura 2-10).

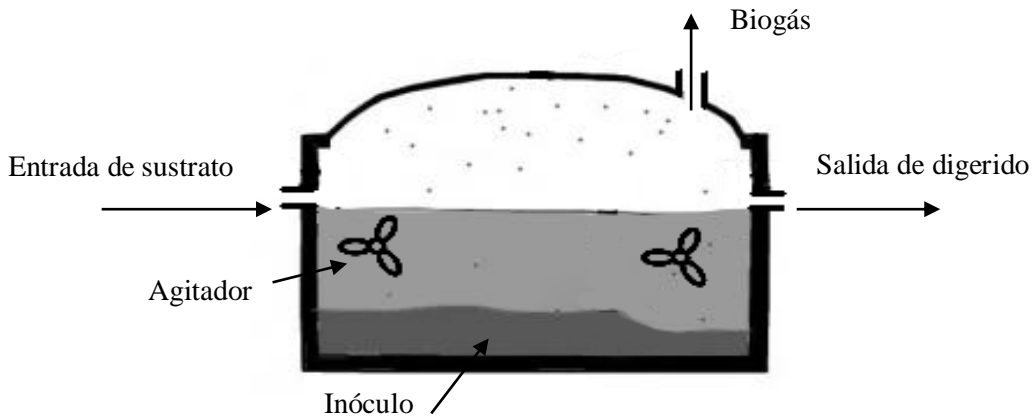


Figura 2-10. Esquema general de un digester anaeróbico con agitación

Nutrientes: Los microorganismos presentes en el proceso de digestión anaeróbica necesitan una fuente de carbono como fuente de energía y una de nitrógeno como fuente para su crecimiento y reproducción, además para la síntesis de proteínas. Se sugiere trabajar a relaciones de carbono: nitrógeno entre 20:1 a 30:1 [54]. Este balance de nutrientes adecuado favorece el crecimiento de las bacterias anaerobias y estabilizan el reactor.

Cuando en el reactor existe un desequilibrio de nutrientes se debe recurrir a procesos de CoDA, que consiste en mezclar dos o más sustratos diferentes para suplir la deficiencia de uno. Exceso de nitrógeno en el proceso propicia la producción y acumulación de amonio. Este se convierte en un inhibidor para las bacterias metanogénicas cuando el amonio en forma libre (NH_3) atraviesa las membranas celulares [55].

2.3.4 Mono- y codigestión anaeróbica

La digestión anaeróbica se puede llevar a cabo usando un solo sustrato (monodigestión) o una mezcla de sustratos (codigestión). Cuando se utiliza un único sustrato, el proceso está condicionado por las propiedades fisicoquímicas, existencia y disponibilidad del material, razón por el cual se pueden presentar inconvenientes para el proceso o inhibiciones durante el proceso de DA. La monodigestión (MoDA) con estiércol de animales presenta baja carga orgánica y altas concentraciones de amonio, los residuos agrícolas y agroindustriales son estacionales y carecen de amonio, los residuos de matadero presentan alta concentración de nitrógeno y ácidos grasos de cadena larga, en el caso de la

fracción orgánica de residuos sólidos urbanos (FORSU) cuando no se separa en la fuente puede contener elevada concentración de metales pesados.

Por lo anterior, se realizan ensayos de CoDA para contrarrestar la carencia nutricional de cada sustrato individual. La CoDA puede tener dos o más sustratos con propiedades complementarias con el propósito de aumentar la producción de biogás con respecto a su producción individual. En algunos casos, se desea aumentar el rendimiento de biogás de un sustrato en particular por diversas razones como la alta generación del material que se encuentra sin uso y representa un foco de contaminación para el lugar donde se dispone.

Durante este estudio se realizó la CoDA de la FORSU, sustrato con una relación C/N inferior a la recomendada para el proceso de digestión anaerobia y los residuos de cosecha de banano (P y R), los cuales a pesar de ser un material lignocelulósico presentan otras características como alta relación C/N, humedad y disponibilidad de uso.

2.3.5 Aplicaciones actuales de la digestión anaerobia

- Situación internacional

En la actualidad son diversas las experiencias adquiridas por la incorporación de la tecnología de la digestión anaeróbica para sustituir leña y combustibles fósiles por biogás y biometano.

En China, desde 1970 se ha considerado el desarrollo de la tecnología del biogás como una forma eficaz de utilizar racionalmente los recursos naturales. Desde el 2003 el programa *National Debt Aid* ha financiado plantas de biogás para residuos agrícolas. Posterior a la aprobación de la Ley de Energía Renovable de China se destinó para biogás 720 mil millones de dólares logrando 43 millones de usuarios de biogás [65]. Dentro de sus objetivos estuvo conseguir 44 billones m³ de biogás y 30 GW para el 2020 [66].

En India se lanzó el Programa Nacional de Desarrollo de Biogás (NPBD). En la actualidad tienen más de 4.6 millones de plantas de biogás y se espera más de 6.5 millones para el 2022. El gobierno indio financia el 98% del costo de la planta (270 dólares en promedio) [67], [68].

En Alemania el biogás a gran escala se potencializó entre 2009-2011, sin embargo, tras la nueva ley de uso de cultivos energéticos reorientó la industria a la biomasa derivada de los desechos ocasionando la reducción de nuevas plantas de biogás instaladas en 2014 [14]. El gobierno alemán

proyectó alimentar 6 mil millones de m³ de biometano a la red de gas natural (RGN) para el 2020, se espera que sean 10 mil millones de m³ en el 2030, esto representa casi el 12% del consumo actual de gas natural en Alemania [69], [70].

En Nicaragua se desarrolló el Programa Nacional de Biogás (PNB) en el 2012, este país cuenta con una de las tasas más bajas de electrificación de América Latina. El programa logró la instalación de 1 200 biodigestores. Fueron varios los desafíos y logros que ha tenido que superar el PNB, sin embargo, es el programa que más digestores ha instalado en Latinoamérica [71]–[73].

México también cuenta con un PNB, el programa cubrió la fabricación de sistema de biogás (biobolsas) capaces de producir 1 m³/ día de biogás equivalente a 2.2 kWh [74], [75].

En general, son varios los países que han implementado PNB [71] teniendo logros y desafíos. Se destaca los casos de Georgia, Costa Rica, Guatemala, Chile, Brasil, Bolivia, y Argentina.

- Situación nacional

Las primeras plantas de biogás se construyeron como parte de las PTAR en Cali, Medellín y Bogotá. También en el relleno sanitario Doña Juana y Curva de Rocas se hace el aprovechamiento del biogás [76]. En 1986 se publicó el primer manual de instalación de biodigestores a partir de experiencias previas en Etiopía y Australia. En el 2012 tras las iniciativas de la Fundación para la producción Agropecuaria Tropical sostenible (UTA) se formó la Red de energía de la Biomasa de Colombia (REDBIOL) conformada hoy por más de 55 organizaciones. Las Asociaciones ASPROINCA (Asociación de Productores Indígenas y Campesinos de Riosucio, Caldas) y EL COMUN (Asociación de Organizaciones Campesinas y Populares de Colombia) cuentan con más de 300 y 100 biodigestores instalados respectivamente [71].

2.3.6 Valorización del biogás y biometano

El biogás se produce por la degradación de la materia orgánica en condiciones anaerobias. Puede originarse en rellenos sanitarios y digestores. Está compuesto principalmente de 55-70 % de metano (CH₄), y 30- 45% dióxido de carbono (CO₂) y otros compuestos minoritarios como agua (H₂O), sulfuro de hidrógeno (H₂S), amoníaco (NH₃), nitrógeno (N₂) y trazas de compuestos orgánicos volátiles como siloxanos, mercaptanos y terpenos. La calidad del biogás está condicionado al

sustrato o mezclas de sustratos digeridas y los parámetros del proceso. Su poder calorífico depende de la concentración de CH₄ en la mezcla, por este motivo cuando se utiliza como combustible o para inyección a la red, debe retirarse el 100 % de CO₂ y demás impurezas, el resultado es un combustible denominado biometano que tiene propiedades similares a las del gas natural (GN), lo que convierte el biometano en un sustituto de GN. En general, cada aplicación de biogás está regida por unos parámetros mínimos relacionado con su purificación (ver Tabla 2-3). Existen diversas técnicas de remoción como lavado a presión contracorriente con agua, uso de soluciones alcalinas, adsorción con carbón activado, tamices moleculares, separación criogénica, entre otros [55]

En el mundo 125 millones de personas utilizaron biogás como combustible de cocción durante el año 2017, representando 15.5 mil millones de m³, donde la mayor participación la tuvo China e India, estos países implementaron esta tecnología para proporcionar combustible de cocción en las zonas rurales [66]. Alemania por su parte ha sido el precursor del biogás a gran escala en Europa, tuvo 10 000 plantas de generación eléctrica con biogás que generaron 28 000 GWh en el 2015[69].

En Colombia la Comisión de Regulación de Energía y Gas (CREG) en su resolución 240 de 2016 adopta las normas aplicables al servicio público domiciliaria de gas combustible con biogás y biometano [77].

Tabla 2-3. Aplicaciones del biogás y su grado de purificación

Aplicación	CO ₂ (%)	H ₂ S (ppm)	H ₂ O	Otros
Calderas (calor)	No	<1000		No No
Motor de combustión interna (CHP*)	No	<1000	Evitar la condensación	Total
Turbina de gas	No	<70 000		Total Total
Pila de combustible	No	<0.1		No Total
Combustible vehículos	Total	Total		Total Total
Inyección red de gas natural	<2.5%	<15		Total Total

Fuente: [78] *Unidad de cogeneración (por sus siglas en inglés, *Combined Heat and Power Unit*)

El biogás es cada vez más empleado como combustible en países como Suiza, Alemania, Suecia. Los vehículos de biometano presentan bajas emisiones de CO₂, material particulado y NO_x. La distancia recorrida por un vehículo es mayor cuando el combustible utilizado es biometano [54], cabe mencionar que estos datos fueron reportados haciendo uso de cultivos energéticos, para el

biometano y demás combustibles la materia prima debería ser biomasa residual con el fin de no alterar la seguridad alimentaria (ver Figura 2-11).

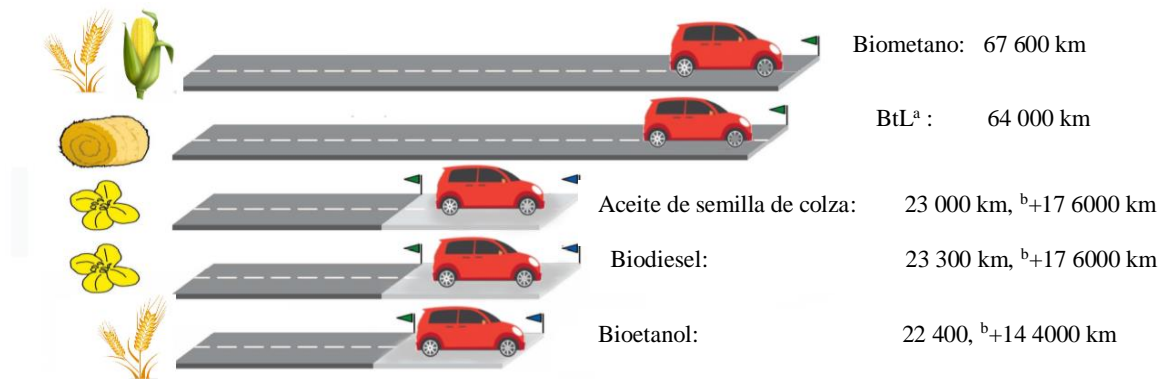


Figura 2-11. Comparación de biocombustibles producidos a partir de cultivos energéticos (izquierda) testeado por la distancia recorrida por un automóvil. ^aBtL biomasa a biocarburos líquidos (por sus siglas en inglés, biomass to liquid) ^bDistancia recorrida utilizando biometano como combustible producido a partir de malta, paja y colza.

Fuente: adaptado de [54]

2.4 Digestión anaerobia de FORSU y RCB

En la literatura científica existen cientos de estudios sobre el tratamiento anaerobio de la FORSU en MoDA y CoDA. Sobre la digestión de RCB, principalmente P y R, hay menor reporte. En la Tabla 2-4, Tabla 2-5 y Tabla 2-6 se exponen las principales investigaciones y resultados sobre la DA de la biomasa tratadas en este estudio.

2.4.1 Digestión anaeróbica de FORSU

Dada la amplia y diversa información científica sobre la digestión anaeróbica de la fracción orgánica de residuos sólidos urbanos (FORSU) en la Tabla 2-4 se presentan algunos estudios relevantes. La FORSU puede comprender desperdicios de alimentos, desperdicios de jardín, papel, periódicos y otros desechos orgánicos. En este estudio se ha considerado la FORSU como los desperdicios de alimentos, en consecuencia, los datos presentados a continuación corresponden a material orgánico proveniente de desperdicios de comida.

2.4.2 Digestión anaerobia de RCB sin pretratar

En la literatura científica son contadas las investigaciones de la DA de RCB (ver Tabla 2-5), la mayoría fueron orientados a la obtención de bioetanol, fibras y evaluación de recuperación de glucosa. En otros casos se estudió la DA del fruto y las cáscaras de banano, no obstante, el fruto puede utilizarse para el alimento y las cáscaras son residuo del consumidor final, por lo tanto, no hacen parte de este estudio.

2.4.3 Digestión anaeróbica de RCB pretratados

A continuación se presentan los resultados de investigaciones cuyo objetivo fue el incremento del rendimiento de metano llevando a cabo pretratamientos del P y R crudo. (Ver Tabla 2-6).

2.4.4 Codigestión de FORSU y RCB

No existe el primer reporte científico y experimental sobre la evaluación de la CoDA de la FORSU y P y R como RCB. No obstante, como se mencionó en los numerales 2.4.1 y 2.4.2 existen investigaciones previas de las monodigestiones que permitieron comparar los resultados de este estudio.

2.5 Evaluación de proyectos de biogás rural

Para llevar a cabo un proyecto es necesario tener en cuenta indicadores de evaluación. En el caso de proyectos ambientales que contribuyan a la descarbonización se deben conocer los incentivos tributarios nacionales e internacionales que favorezca su viabilidad. Para el caso particular de proyectos de autoabastecimiento energético en zona rurales, su inversión considera los gastos en capital o CAPEX (por sus siglas en inglés, *Capital Expenditure*). Los gastos de operación u OPEX (por sus siglas en inglés, *Operational Expenditures*) no se tienen en cuenta debido a que el usuario de la planta es quien la opera.

Tabla 2-4. Antecedentes de mono y co-digestión anaerobia de la fracción orgánica de residuos sólidos urbanos -FORSU

Monodigestión o codigestión	Condiciones de operación	Resultados	Referencia
MoDA FORSU	$ST_{\text{sustrato}}/ST_{\text{inóculo}}$ de 3.3, se digirió a 55 °C durante 20 días	490 $L_{\text{biogás}}/\text{kg TSV}$, y remoción de 54% de ST	[79]
MoDA FORSU	$SV_{\text{sustrato}}/SV_{\text{inóculo}}$ de 0.5 se digirió a 35 °C durante 30 días	250 $L_{\text{CH}_4}/\text{kg ST}$	[80]
MoDA FORSU y CoDA FORSU, paja de arroz (PA), lodo activo espesado (LAE) tratado térmicamente	Los sustratos se digirieron a 37 °C durante 55 días	FORSU = 214.5 $L_{\text{biogás}}/\text{kg SV}$ FORSU+PA+LAE = 520 $L_{\text{biogás}}/\text{kg SV}$	[81]
CoDA FORSU y tusa de maíz	Los sustratos se digirieron a 37 °C durante 44 días a un pH de 6.8 y relación C/N de 23.4	FORSU(75%)+TM(25%) = 490 $L_{\text{CH}_4}/\text{kg SV}$	[82]
CoDA de FORSU (solo desperdicios de comida) y residuos de jardinería (RJ)	FORSU con 9.11 % ST, RJ con 93% ST se digirieron a 36°C y 30 rpm en reactores en semicontinuo	FORSU = 60 $L_{\text{CH}_4}/\text{kg SV}$ FORSU+RJ = 470 $L_{\text{CH}_4}/\text{kg SV}$	[83]
CoDA FORSU y residuos de frutas y vegetales (RFV)	Se digirieron a 35 °C y C/N 34.7	FORSU (1)+RFV(3) = 397 $L_{\text{CH}_4}/\text{kg TSV}$	[84]
CoDA de FORSU y estiércol bovino (EB) y gallinaza (G)	Se digirió a 35 °C y 5% ST de la mezcla durante 21 días en un reactor semicontinuo	450 $L_{\text{CH}_4}/\text{kg TSV}$ con 72% de remoción de TVS	[85]
CoDA de FORSU, rumen, estiércol bovino, paja, desechos de frutas y vegetales.	La FORSU se sometió a un pretratamiento térmico de pasteurización a 72 °C durante 1 hora. La mezcla se digirió durante 35 días a 52 °C	No hubo efecto del pretratamiento sobre el rendimiento de metano. El rendimiento fue 800 $L_{\text{CH}_4}/\text{kg SV}$	[86]

Tabla 2-5. Antecedentes de mono y co-digestión anaerobia de residuos de cosecha de banano (pseudotallo y raquis).

Monodigestión o codigestión	Condiciones de sustrato y operación	Observaciones	Resultados	Referencia
MoDA de pseudotallo y raquis	El P con 88.7% ST y R con 90.1% ST se sometieron a DA durante 188 días a 30 °C.	Desbalance nutricional	P=162 L _{CH4} /kg ST R=144 L _{CH4} /kg ST	[25]
MoDA de pseudotallo	El P con 6.55%ST se digirió durante 30 días	Desbalance nutricional	P = 387 L _{CH4} /kg ST	[87]
MoDA de pseudotallo y CoDA de P con estiércol bovino (EB)	El P se utilizó húmedo con tamaño de partícula de 20mm, SV _{sustrato} /SV _{inóculo} de 0.5 y se digirió durante 34 días a 37 °C	Se presentó un efecto antagónico.	P= 347 L _{CH4} /kg SV P+35%EB =322 L _{CH4} /kg SV	[88]
MoDA de pseudotallo	El P con 8.60% ST se digirió en 35 días a 37 °C en reactor de 2 L.	Desbalance nutricional	P= 256 L _{CH4} /kg SV	[89]
CoDA de pseudotallo y estiércol porcino (EP)	El P con 67.2% ST y EP con 88.0% ST se digirieron durante 40 días	Se presentó un efecto sinérgico.	P+EP= 232.4 L _{CH4} /kg SV	[90]

Tabla 2-6. Antecedentes de mono y co-digestión anaerobia de residuos de cosecha de banano (pseudotallo y raquis) pretratados con métodos fisicoquímicos y químicos para el aumento de su degradabilidad

Monodigestión o codigestión	Condiciones de sustrato y operación	Observaciones	Resultados	Referencia
MoDA de pseudotallo y raquis pretratados con explosión con vapor (SE)	El P y R con 93%ST se pretrataron con SE a un factor de severidad de 3.16. Después se digirieron durante 135 días a 30°C.	La SE aumento 40% el rendimiento de metano	Fracción sólida de SE= 270.5 $L_{\text{biogás}}/\text{kg SV}$ Fracción líquida del SE= 259 $L_{\text{biogás}}/\text{kg SV}$	[91]
MoDA de pseudotallo húmedo sometido a pretratamiento de extracción de jugo orgánico	El Pse digirió a 37°C durante 20 días con una relación de $SV_{\text{sustrato}}/SV_{\text{inóculo}}$ de 1	El pretratamiento de extracción del jugo orgánico del P aumento el rendimiento de metano	$P=204.2 L_{\text{CH}_4}/\text{kg ST}$	[92]
MoDA de pseudotallo con tratamiento enzimático con Celluclast (C15L) y Methaplast CoDA (Met100)	El P se digirió a $SV_{\text{sustrato}}/SV_{\text{inóculo}}$ de 0.5 durante 34 días a 37 °C	El pretratamiento no incremento el rendimiento de metano tras la adición de enzimas	$P+60\text{FPU (C15L)} = 343 L_{\text{CH}_4}/\text{kg SV}$ $P+10\text{FPU(Met100)} = 336 L_{\text{CH}_4}/\text{kg SV}$	[88]
CoDA de pseudotallo pretratado por hidrólisis básica y estiércol porcino	El P con 67.2% de ST se sometió a pretratamiento alcalino durante 54 h y 55°C. la DA transcurrió a 35 °C, relación $ST_{\text{sustrato}}/ST_{\text{inóculo}}$ de 4	El rendimiento de metano incremento utilizando 6% NaOH	$P= 232.4 L_{\text{CH}_4}/\text{kg ST}$	[90]

Los datos del análisis técnico y económico de un proyecto se utilizan para el cálculo de los indicadores financieros como la tasa interna de retorno (TIR), el valor presente neto (VPN), relación beneficio costo (B/C), índice de rentabilidad (IR) y método de periodo de recuperación de inversión, a partir de estos datos se toman decisiones sobre la ejecución, modificación o no ejecución del proyecto. No obstante, el cálculo de estos indicadores también está condicionado por el flujo de caja, el cual permite conocer los ingresos y gastos que se reflejan en la solvencia y liquidez del proyecto. Por lo anterior, cuando el objetivo del proyecto es cubrir una necesidad básica como el acceso al gas domiciliario y energía eléctrica en zonas no interconectadas (ZNI) se dificulta la realización del flujo de caja dado que se conoce la inversión, pero no existen ingresos monetarios por venta de gas, energía o digerido en proyectos de autoabastecimiento energético a partir de procesos de DA.

En conclusión, la mejor medida de conocer la viabilidad de un proyecto de este tipo es comparar el precio de cubrir las necesidades de gas y energía en estas zonas con el método tradicional (gaseoductos y centrales eléctricas) frente a lo que cuesta el desarrollo de un proyecto de autoabastecimiento energético utilizando residuos de cosecha de banano o plátano para la producción de biogás y posterior aprovechamiento en la generación de gas domiciliario y energía eléctrica. En esta investigación se entregan los datos de llevar a cabo el proyecto de autoabastecimiento.

2.5.1 Políticas públicas e incentivos tributarios en Colombia

Mediante el decreto 926 de 2017 el país certificó “ser carbono neutro” para contribuir con la reducción de emisiones de GEI generadas por el uso de combustibles fósiles, y se creó el impuesto nacional al carbono en la Ley 1819 de 2016. Cuando se utiliza el biogás o biometano como combustible este impuesto se puede evitar y recibir a cambio bonos de carbono de alrededor de 15 000 COP [93]. Una de las oportunidades de la utilización de la biomasa residual para su uso como combustible son los beneficios otorgados por el decreto 2143 de 2015 como exclusión de IVA, deducción del 50% de la inversión y exclusión de gravámenes arancelarios. También los incentivos descritos en la Ley 1715 de 2014 en donde se promueve la generación distribuida y el establecimiento de generación híbrida con fuentes renovables. La Red Colombiana de energía de la Biomasa (RebBiocol), la Red Nacional de Agricultura Familiar (RENAF) y la economía solidaria también contribuyen en el desarrollo de estos proyectos.

3 Potencial metanogénico de la FORSU y residuos de cosecha de banano

3.1 Introducción

En Colombia cada año se generan por encima de 23 Mt de residuos de cosecha de plátano y banano -RCB (raquis y pseudotallo) [15] y 6 Mt de la fracción orgánica de residuos sólidos urbanos - FORSU[13]. Existen diversos procesos de aprovechamiento de estas biomásas como el compostaje, alimentación animal, abandono en campo para enmienda del suelo, disposición en rellenos sanitarios, también se ha propuesto su utilización para la producción de productos de alto valor agregado, no obstante, el desarrollo de esta industria genera grandes cantidades de residuos que deben tratarse. Por ende, se explora el uso de estas biomásas para la generación de energía a través de procesos térmicos o biológicos dependiendo el tipo de biomasa.

La digestión anaerobia (DA) es un proceso que permite tratar la biomasa húmeda residual biodegradable y como resultado obtener energía y fertilizante sin generar residuos o gases contaminantes. Esta particularidad ha extendido su implementación a nivel mundial debido al constante cambio que sufre el planeta por la contaminación causada por el uso de combustibles fósiles y la necesidad de diversificar la matriz energética mediante el uso de energías renovables.

Los RCB y la FORSU existirán a largo plazo dada la importancia para el país. Colombia es uno de los principales exportadores de banano en el mundo, por ende, la generación de RCB es inevitable. Por otra parte, la FORSU está condicionada con la existencia de la población, la cual se espera que siga incrementando hasta el 2050 [94]. En consecuencia, se han realizado investigaciones para el aprovechamiento individual de estas biomásas residuales. En el caso de la FORSU, su alta biodegradabilidad permite su utilización en el proceso de DA. Se ha reportado altos rendimientos de biogás y metano de 490 L/kg TSV [79] y 250 L/kg ST [80] respectivamente. No obstante, la heterogeneidad de su composición en el tiempo y el origen afecta la comparación de datos, además de la diversidad de técnicas para la evaluación del potencial metanogénico; existe un amplio rango de rendimientos de biogás y metano en la literatura.

Como resultado, en este estudio se evaluó el rendimiento de biogás y metano utilizando el método de cuarteo para obtener una muestra representativa del material orgánico generado en un restaurante y su utilización como sustrato en el proceso de DA bajo los lineamientos de la norma VDI 4630, la cual es reconocida y aceptada internacionalmente para el desarrollo de ensayos de degradabilidad con el propósito de entregar datos comparables con otros grupos de investigación.

Por su parte, los residuos de cosecha de banano como pseudotallo (P) y raquis (R) se han evaluado para la obtención de alimentos nutricionales, fibras, bioplásticos y producción de etanol principalmente. En los últimos años investigadores orientaron el uso de RCB secos para la producción de biogás a través del proceso de DA reportando rendimientos de metano de 162 y 144 L/kg ST para P y R respectivamente [25]. No obstante, una de las ventajas de la fermentación anaerobia es que el material puede usarse húmedo, los RCB presentan humedad superior a 90%, por lo tanto, un periodo de secado representa tiempo y costos; puede tardar hasta 30 días expuesto al sol para obtener 90% ST. Por esta razón, en este estudio se estudió el potencial metanogénico del P y R húmedos para la producción de metano siguiendo los protocolos de la norma VDI 4630.

Por lo anterior, el objetivo de este estudio fue evaluar el potencial metanogénico de la FORSU y el potencial metanogénico de los RCB húmedos como información preliminar para una posterior codigestión de estos sustratos.

3.2 Metodología

La evaluación del potencial metanogénico (PBM) consistió en determinar la máxima producción de metano de la fracción orgánica de residuos sólidos urbanos (FORSU) como sustrato para el mejoramiento de la digestión de residuos de cosecha de banano (RCB) P y R mediante la codigestión anaeróbica (CoDA) que se describe en el capítulo 4. Así mismo, se evaluó el PBM de P y R.

3.2.1 Sustratos e inóculo

- Sustratos

La FORSU se recolectó de la cafetería del Centro de Investigaciones Energéticas, Medioambientales y Tecnológicas (CIEMAT) de Madrid- España durante una semana para lograr una mayor variedad de residuos. El material se separó en la fuente, es decir, no se combinó con ningún otro tipo de residuo que pudiese contaminar la muestra. El material se compuso de cáscaras, hojas y tallos de vegetales y frutas crudas, conjunto que denominaremos cáscaras de aquí en adelante y alimento dejado en los platos, no incluyó ni huesos ni servilletas, conjunto que denominaremos desechos de comida cocinada (ver Figura 3-1). Cada día de recolección el material se sometió a una reducción de tamaño de partícula, las cáscaras se llevaron a dimensiones de 20 mm*20 mm*20 mm y el

material blando se licuó. Posteriormente, ambas fracciones se licuaron para homogenizar, el material se almacenó a 4 °C para su análisis. Durante los 5 días se realizó el mismo procedimiento, al quinto día las muestras refrigeradas se recolectaron y se realizó un cuarteo [95] para obtener una sola muestra de análisis.

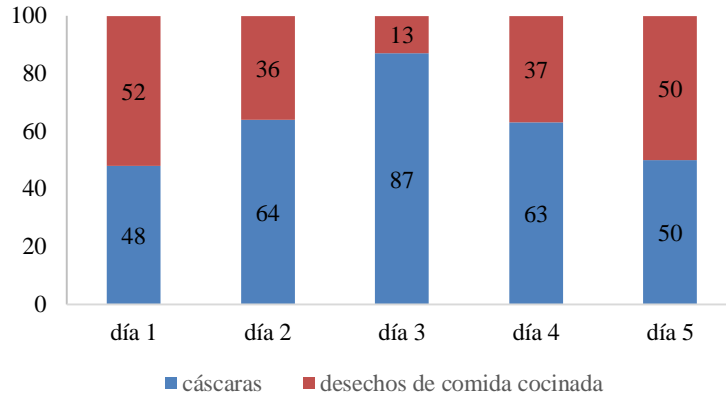


Figura 3-1. Caracterización de la fracción orgánica de residuos sólidos urbanos (FORSU) discriminada en cáscaras de frutas y vegetales y desechos de comida cocinada recolectada durante una semana. Los datos están expresados en porcentaje.

También se evaluó la FORSU proveniente de la cafetería del edificio de medicina de la Universidad Nacional de Colombia- sede Bogotá, realizando el mismo procedimiento descrito para la FORSU del Ciemat. Esta muestra se utilizó principalmente para llevar a cabo el análisis de azufre descrito en el numeral 3.3.5 *Análisis de azufre*. Un experimento previo con este material demostró que un pretratamiento de higienización con pasteurización lenta no influye en la producción de biogás debido principalmente a que el material utilizado se separó en la fuente sin ser combinado con residuos no biodegradables, contaminados ni en estado de descomposición. Además, el material después del pretratamiento no presentó pérdida de humedad, sólidos totales ni sólidos volátiles. En otro estudio, la FORSU proveniente de rellenos sanitarios, la cual tiene menor humedad a la separada en la fuente presenta disminución en su potencial de biogás cuando se le aplican métodos de higienización como la esterilización [96].

El P y R pertenecientes a la planta de la especie *Musa acuminata* se recolectaron en Gáldar, un municipio en el norte de Gran Canaria (Islas Canarias, España), un sitio con una alta extensión en

cultivos de banano, nombrados de aquí en adelante como residuos de cosecha de banano (RCB), el banano también se llama plátano, guineo, maduro o cambur, universalmente se utiliza la palabra banano razón por la cual durante el texto se hace referencia a RCB y no residuos de cosecha de plátano. Los RCB se sometieron a una reducción de tamaño de partícula de 18 mm-20 mm y se refrigeraron a 4 °C para su posterior análisis. El tamaño de partícula se seleccionó de acuerdo a investigaciones previas en las cuales el más alto rendimiento de metano se observó a tamaños de partícula de 20 mm [88].

Otra muestra de P y R de la misma especie se recolectó en una finca con baja densidad de cultivos de banano en la ciudad de Yopal- Casanare. Estas muestras se trataron de la misma forma a las recolectadas en Gáldar y se utilizaron para determinar la composición del biogás producido.

- Inóculo

El inóculo tuvo dos orígenes. Para los PBM se utilizó un inóculo proveniente del digestor anaerobio de una PTAR que funciona a 37 °C en Madrid-España. Durante un experimento complementario se utilizó un inóculo granular de un reactor anaerobio de flujo ascendente (UASB por sus siglas en inglés, *Upflow Anaerobic Sludge Blanket*) que es operado a 37 °C. Los lodos son originarios de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR) de la empresa Alpina ubicada en Sopo-Cundinamarca.

3.2.2 Método experimental

El trabajo experimental se dividió en dos partes, que son complementarias entre sí. Inicialmente se realizaron ensayos de biodegradabilidad para la FORSU y RCB siguiendo protocolos internacionales aceptados y referentes en el área de DA como la norma alemana VDI 4630. En la última parte del trabajo experimental, se realizó el PBM de los sustratos de estudio con el fin de conocer la composición del biogás obtenido, información necesaria para el capítulo 5.

- Ensayos de biodegradabilidad- monodigestión

Los ensayos de biodegradabilidad tienen como objetivo conocer la máxima producción de biogás y metano de un sustrato. La primera parte del trabajo experimental se realizó utilizando el equipo AMTSP II (ver Figura 3-2). El AMTSP II es un equipo para realizar análisis de potencial de metano. Realiza el conteo de metano producido a través del desplazamiento de líquido y flotabilidad, el gas se difunde en una barrera líquida (agua en este caso). Este equipo hace la medición sobre el metano

producido y no biogás. Un pulso digital se genera cuando un volumen definido de gas pasa a través de esa parte del equipo. El volumen de gas calculado es normalizado a condiciones estándar STP (por sus siglas en inglés, *Standard Pressure and Temperature*). A continuación, se describe las unidades del equipo y su utilidad en el ensayo (ver Figura 3-2). Para mayor información del equipo revisar su manual [97].

- *Unidad de incubación:* conformada por reactores anaerobios de 500 ml con sistema de agitación individual con motor de inversión de dirección y temporizador (programada para cambiar de rotación cada 15 segundos), y un baño de agua termostático para ajustar la temperatura. Contiene una válvula en un solo sentido para que el biogás producido en los reactores circule hacia la solución de NaOH y no en sentido opuesto.
- *Unidad de absorción de CO₂:* compuesta por botellas de vidrio a las que se conecta cada reactor anaerobio y contienen solución de 3M NaOH para eliminar el CO₂ y H₂S del biogás que la atraviesa.
- *Unidad de medición de metano:* El gas que llega a esta unidad se le ha removido el CO₂, por tanto, la medición que se hace es de metano. Está conformado por celdas de inyección de flujo, y un tanque de agua en donde se libera el gas.
- *Lectura y archivo del metano producido:* el equipo precisa de un software para su funcionamiento, aquí se ingresan los parámetros de medida de cada experimento. Un ordenador se conecta al equipo y se mantiene encendido durante el ensayo con el propósito de estar monitoreando en tiempo real la producción de metano.

Una vez que cada unidad está instalada el montaje experimental está listo y se puede dar inicio al ensayo de biodegradabilidad.

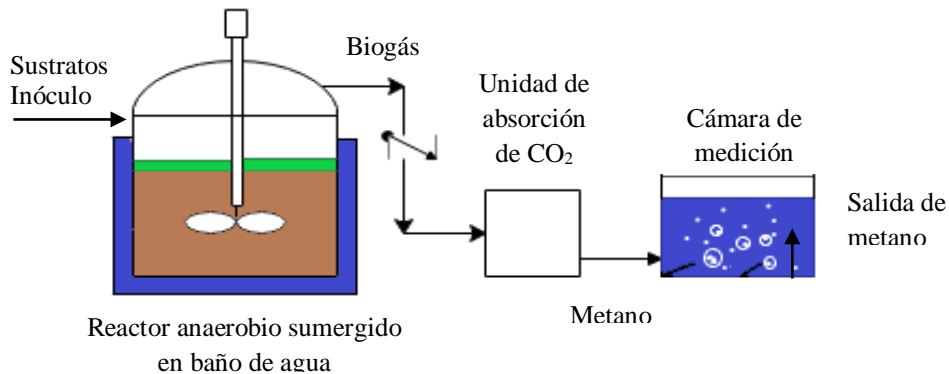


Figura 3-2. Esquema simplificado equipo AMPTS II para ensayos de biodegradabilidad.

La segunda parte del trabajo experimental se utilizó el equipo Anaero Technology (ver Figura 3-3). Este equipo cuenta con reactores anaerobios. El volumen de gas producido es normalizado a STP. A continuación, se describen las principales unidades del equipo. Para mayor detalle sobre el equipo consultar su manual [98].

- *Unidad de incubación:* conformada por reactores anaerobios de 1000 ml con un sistema de agitación continuo en una sola dirección y un baño de agua termostático con ajuste de temperatura, en el cual los reactores se sumergen. Una válvula en un solo sentido para que el biogás producido circule hacia la cámara de medición, y no en sentido contrario.
- *Unidad de medición de biogás:* el biogás producido se mide usando un medidor de flujo de gas de desplazamiento líquido. Este medidor contiene cubos giratorios donde se almacena el gas y se conectan individualmente a cada reactor. El líquido donde está sumergido cada cubo esta interconectado con las demás con el propósito de mantener una misma altura y presión de carga sobre todos los reactores.
- *Unidad de análisis de biogás:* el biogás que sale de la unidad de medición, se almacena en bolsas Tedlar, las cuales una vez llenas se pasan por el medidor 5000 biogás para conocer su composición. Esta medición no es continua ni automática. Normalmente se hace un análisis semanal.
- *Unidad de archivo de datos:* Consta de un microcontrolador Arduino en donde se almacena la información correspondiente a la producción de biogás, que después deben ser tratados.

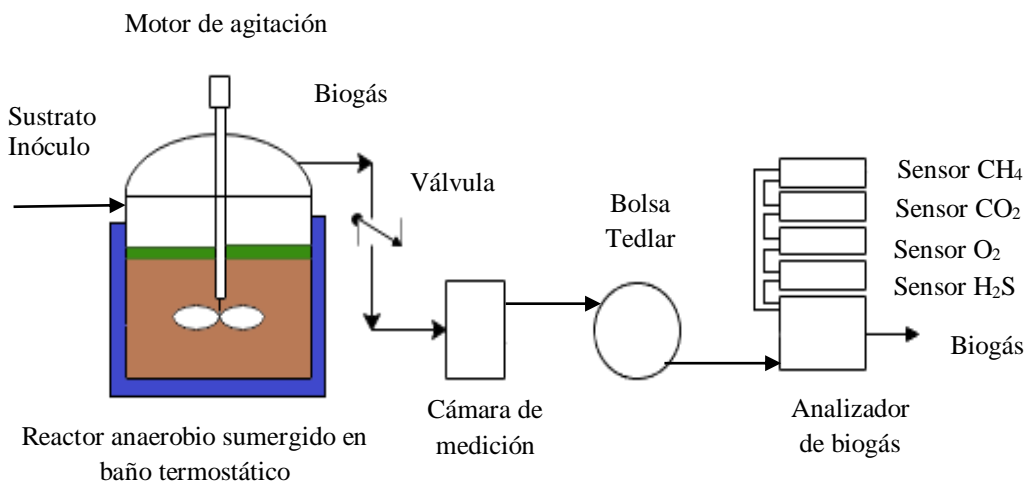


Figura 3-3. Esquema simplificado equipo Anaero Technology para ensayos de biodegradabilidad.

- Procedimiento experimental

El primer paso para iniciar los ensayos es la selección y recolección de los sustratos e inóculo de estudio. Posteriormente se realiza una homogenización de los sustratos por separado. Los sustratos sólidos pasan por un proceso de reducción de tamaño de partícula, o licuado para conseguir una pasta homogénea como el caso de la FORSU. Los RCB pese a que contienen alta humedad no se licuaron porque sus fibras quedaban enredadas en las aspas de la licuadora convencional. Este material se sometió a reducción de tamaño de partícula en una licuadora industrial.

Consecutivamente se realizó la caracterización de los sustratos mediante análisis próximo para conocer los SV, y ST. El parámetro de SV fue utilizado para calcular la alimentación de sustrato e inóculo al reactor de acuerdo a la relación de $SV_{\text{sustrato}}/SV_{\text{inoculo}}$ seleccionada para el ensayo. Los datos de SV y ST en el inóculo también son un indicador de calidad. Los SV deben ser igual o superior al 50% del contenido de ST. El contenido de SV en el inóculo hace alusión a la proporción de microorganismos en el medio. Esta medida no discrimina entre bacterias vivas o muertas, en consecuencia, se utiliza la relación SV/ST como indicador de la biomasa activa en el lodo.

Tras el análisis próximo, el inóculo se sometió a un proceso de predigestión durante 4 días a las condiciones seleccionadas del ensayo de DA. Esto se realiza para reducir la producción endógena de biogás y que al final del ensayo se debe sustraer de los resultados obtenidos. Después de la predigestión, se realizan las mezclas de acuerdo a los SV del sustrato e inóculo. Se alimenta el reactor con las cantidades máxicas calculadas, se sellan y se sumergen en el baño y se prende el sistema de mezclado. Tras 2 minutos de mezclado se realiza el muestreo sobre uno de los tres reactores utilizados para la misma mezcla. Esto quiere decir que las muestras se realizaron por duplicado debido a que el tercer reactor fue utilizado para análisis al inicio y al final del ensayo.

Una vez el montaje experimental está listo y todas las unidades están conectadas se da inicio al ensayo de biodegradabilidad. El ensayo duró entre 28-30 días teniendo en cuenta la producción de biogás, cada ensayo se dio por terminado cuando el incremento diario en la producción de biogás fue inferior al 1 %. Durante el ensayo la temperatura y la agitación se mantuvo constante y no hubo ninguna acción sobre los digestores. Al final del ensayo, se realizó el análisis próximo de SV, ST sobre el mismo reactor utilizado al inicio para el mismo análisis.

En el caso de los ensayos realizados en el equipo Anaero, el biogás se recolectó en una bolsa Tedlar un día por semana para determinar su composición de CH₄, CO₂, O₂ y H₂S. El análisis de composición se realizó por duplicado.

3.2.3 Diseño experimental

- Ensayos de biodegradabilidad de FORSU, pseudotallo y raquis

Este diseño de experimentos tuvo como objetivo conocer la máxima producción de metano de los sustratos de interés para el desarrollo del capítulo 4 (ver Tabla 3-1). Las condiciones de los ensayos de DA se realizaron siguiendo los lineamientos de la norma alemana VDI 4630. Lo único que varió en el diseño fue el tipo de muestra.

Tabla 3-1. Condiciones de los ensayos de monodigestion de la FORSU, raquis y pseudotallo para determinar máximo potencial de metano

Muestra	FORSU (%SV)	P (%SV)	R (%SV)	T(°C)	SV _{sustrato} /SV _{inóculo}	t (días)	Replicas
1	100	0	0	37	0.5	28	2
2	0	100	0	37	0.5	30	2
3	0	0	100	37	0.5	30	2

3.2.4 Métodos analíticos

Los métodos analíticos seguidos en este trabajo son protocolos debidamente establecidos, en su mayoría se hicieron por triplicado y solo para algunos casos por duplicado.

- Sólidos totales y sólidos volátiles (ST, SV)

Los ST y SV se realizaron sometiendo la muestra de biomasa a un secado a 105 °C durante 24 horas o peso constante, y posterior calcinación a 550 °C durante una hora de acuerdo a los propuesto en APHA (American Public Health Association) [99].

- Cenizas (Ce)

La Ce se determinaron de acuerdo al protocolo de NREL [100]. La muestra de biomasa seca a 105 °C se sometió a calcinación a 575 °C durante 4 horas.

- Análisis elemental (C, H, N, S)

La muestra de biomasa se seca a 60 °C sobre la cual se realiza una combustión a 1000 °C en un analizador elemental LECO TruSpec CHNS. El porcentaje restante se consideró oxígeno. Estos análisis se realizaron bajo la supervisión del personal del departamento de química del CIEMAT.

- Nitrógeno total Kjeldahl (NTK)

El NTK se analizó por el método Kjeldahl utilizando un destilador Büchi Kjelflex y un titrador automático [101].

- Relación ácidos grasos volátiles y alcalinidad total (FOS/TAC)

La relación de ácidos grasos volátiles y alcalinidad total se determinó utilizando un equipo de FOS/TAC Hach automático [102].

- pH

El pH se midió con un pH-metro, para las muestras líquidas la medición se hizo directamente sobre la muestra; en el caso de las muestras sólidas se diluyó 1:5 (muestra: agua), se agitó durante 2 horas y se realizó la medida de pH sobre el coloide resultante.

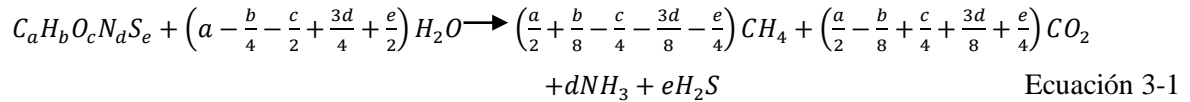
- Análisis bioquímico (glucanos, hemicelulosa, lignina, proteínas, grasas y aceites)

El análisis de glucanos, hemicelulosa y lignina se realizó siguiendo el protocolo de NREL [103]. La muestra de biomasa seca a 105 °C se mezcló con 3 ml de ácido sulfúrico y se colocó en un baño de agua a 30 °C durante 1 hora. Tras la hidrólisis la muestra se diluyó (4% concentración del ácido) y se esterilizó en autoclave a 121 °C durante 1 hora. Una fracción de la hidrólisis se envió al laboratorio de cromatografía del departamento de biomasa del CIEMAT, en donde se analizó su contenido de azúcares por HPLC (por sus siglas en inglés *High Performance Liquid Chromatography*). La parte restante de la hidrólisis se utilizó para la determinación de lignina insoluble.

El contenido de proteínas se determinó por el método Kjeldahl utilizando un factor de conversión de proteínas del 6.25. Las grasas y aceites se determinaron mediante extracción Soxhlet utilizando éter de petróleo como disolvente.

- Contenido energético

El cálculo de contenido energético se determinó teóricamente a partir de la composición elemental de la biomasa, se siguió el método y la ecuación planteada por Buswell-Mueller [104] (ver Ecuación 3-1).



- Energía de la biomasa

Se calculó la máxima energía que puede obtenerse de la conversión del metano procedente de la digestión anaerobia (ver Ecuación 3-2) [92].

$$E_{biomasa} = Y \times PCI \times \eta \quad \text{Ecuación 3-2}$$

Donde E es la energía eléctrica procedente de la biomasa, Y es el rendimiento de metano de la biomasa (m³/ton), PCI es el poder calorífico del metano, el cual se asume como 10 kWh/m³, y η es la eficiencia de conversión, de acuerdo con la literatura se toma 37% [92].

3.2.5 Parámetros de control

Los parámetros de control se llevan a cabo al inicio y al final de los ensayos de DA. Durante las dos primeras partes del trabajo experimental los parámetros utilizados fueron los SV y ST con el fin de conocer la reducción en cada uno de ellos como referencia de la biodegradabilidad de los sustratos en estudio. En esta sección del trabajo experimental también se analizó el biogás producido para conocer la mezcla con mayor producción de metano.

Durante la tercera parte del trabajo experimental, cuyo estudio se basó en la biodegradabilidad de sustratos poco estudiados en la DA como el P y R, los parámetros de control fueron los SV, ST, nitrógeno total Kjeldahl (NTK), relación ácidos grasos volátiles y alcalinidad total (FOS/TAC), y pH.

Los análisis se realizaron por triplicado para el reactor seleccionado con el fin de no alterar en los otros dos la producción de biogás y metano.

3.2.6 Análisis estadístico

Los resultados obtenidos en los ensayos de potencial metanogénico se analizaron estadísticamente utilizando la herramienta análisis de datos de Excel y el software STATA. Los resultados experimentales se presentan con la desviación estándar.

- Medias muestrales

La comparación de las medidas muestrales se basó en comparar los resultados sobre producción de metano. En el trabajo experimental se determinó el sustrato con mayor potencial metanogénico. Para tratar las medias muestrales se utilizó el análisis basado en la varianza (ANOVA). Sin embargo, para hacer uso del ANOVA los datos deben tener una distribución normal, se utilizó la prueba de Shapiro Wilk para determinarlo. Los ensayos de degradabilidad se hicieron por duplicado (n=2) razón por la que no se obtuvo una distribución normal; en estos casos la comparación de media se realizó con el modelo no paramétrico de Kruskal Wallis y criterio propio teniendo en cuenta los resultados obtenidos.

- Cinética de degradación

La producción de biogás puede simularse mediante un modelo de cinética de primer orden (ver Ecuación 3-2). Este modelo se utiliza generalmente para ensayos de biodegradabilidad o potencial metanogénico batch o en lotes como una curva exponencial. Este modelo se ha usado en investigaciones previas de DA donde se obtuvo coeficientes de determinación (R^2) superior a 0.9, es decir, este modelo representa más del 90% de los datos [59], [105], [106] [88], [107]. Esta cinética entrega información sobre la degradación del sustrato.

$$G(t) = G_M [1 - \exp(-k_0 * t)] \quad \text{Ecuación 3-3}$$

Donde $G(t)$ es la producción acumulada de biogás o metano en t días expresado en condiciones STP ($NL*(kg\ SV^{-1})$); G_M es la producción máxima acumulada de biogás o metano conseguida al final del ensayo ($NL*(kg\ SV^{-1})$); t es el tiempo para una producción de biogás o metano acumulada específico (días), y k_0 es la constante de velocidad específica de biodegradabilidad (dia^{-1}). La constante específica de degradación se calculó analíticamente a partir de datos experimentales utilizando una regresión de mínimos cuadrados con un intervalo de confianza del 95 % utilizando el software STATA. El valor k_0 depende de las condiciones del ensayo (temperatura, agitación y concentración

inicial del sustrato), que en este caso fueron constantes en todos los ensayos. Por ende, los valores de k_0 fueron útiles para determinar la cinética de cada sustrato en MoDA.

3.3 Resultados y discusión

En esta sección se presentan los resultados obtenidos del trabajo experimental descrito en la sección 3.2.2 *Método experimental*. Todos los resultados se reportan con la desviación estándar.

3.3.1 Caracterización de sustratos e inóculo

El éxito del proceso de DA depende en gran medida del tipo de sustrato que se va a digerir. Los sustratos utilizados se caracterizaron en su análisis próximo (ST, SV, Ce), último (C, H, N, S) y bioquímico (glucanos, hemicelulosa, lignina, proteínas y grasas y aceites) (ver Tabla 3-2). Esta caracterización fue necesaria para conocer la conveniencia de codigestiones discutidas en el capítulo 4. La FORSU tiene una relación C/N de 16, menor al valor recomendado para el proceso de DA, el cual oscila entre 20-30, el P y R por su parte tienen una relación C/N por encima del valor recomendado [55]. La FORSU tiene el mayor contenido de nitrógeno debido a su contenido de proteínas. Este hecho representa una posible inhibición por la acumulación de amoníaco observada en investigaciones previas [108], lo que justifica la búsqueda de sustratos como P y R para aumentar la relación C/N de la mezcla. La FORSU se analizó considerando la fracción de desechos de comida cocinada (DCC) y cáscaras de frutas y verduras crudas (CFV) de manera informativa. Para los análisis de PBM solo se tuvo en cuenta la información obtenida para la muestra de FORSU.

La FORSU tiene bajo contenido de lignina, razón por la que se considera un sustrato de fácil degradación. En contraste, el P y R tiene un alto porcentaje de lignina y cenizas, sin embargo, es un valor bajo comparado con otras biomásas lignocelulósicas como paja de trigo, paja de arroz o rastrojo de maíz con 23.4%, 23.4 % y 16.6% respectivamente [109]. La lignina aumenta la rigidez de la pared celular evitando que las bacterias degraden el material con facilidad. Los valores de glucanos fue alto y la hemicelulosa baja del P y R de este estudio comparados con los reportados por Guerrero et al [110] (celulosa P 20 %, R 23 %; hemicelulosa P 9.6 %, R 11.2 %).

Los sólidos volátiles de la FORSU fueron 15.23 %, P 4.19 % y R 5.78 % (en base húmeda), estos valores representan la materia orgánica disponible para la producción de biogás. La humedad es alta en todas las biomásas (por encima del 83%), por esta razón no es necesario usar agua para lograr los ST recomendados en la mezcla (ST < 10 %).

El alto contenido de humedad y cenizas en el P y R (Ce P 33.2 %, R 16.8 %) hace costoso su uso en procesos térmicos debido a los tratamientos previos de secado. Por el contrario, estas características son apropiadas para el proceso de DA, el contenido de humedad logra un balance en los ST de la mezcla, y las cenizas funcionan como tampón contrarrestando la acidificación causada por la acumulación de ácidos grasos volátiles que inhiben las metanogénicas productoras de metano. El contenido de cenizas depende el tipo de planta y los nutrientes del suelo donde creció, no obstante, en la mayoría de los estudios se ha reportado alto contenido de cenizas y de humedad.

El pH de la FORSU es bajo para procesos de DA, el P y R tienen valores adecuados de pH, por ende, podrían usarse sin ningún pretratamiento. El inóculo tiene un pH alto (7.85) ayudando a equilibrar el pH de la mezcla, el cual en digestiones de FORSU ha presentado mejores rendimientos de metano en pH 7-7.5 [111].

El inóculo tiene 1.65 % de ST y 1.05 % de SV, estos valores indican una gran proporción de microorganismos, como se explicó en el numeral 3.2.2. la relación SV/ST es un indicador de la biomasa activa en el lodo, por tanto, el lodo utilizado en los ensayos es de buena calidad. Asimismo, tiene un pH adecuado. La concentración de CaCO_3 es alta (2596 mg de CaCO_3/L), este parámetro beneficia el equilibrio del pH del medio cuando la producción de ácidos grasos volátiles (AGV) es alta durante la DA.

En el caso del inóculo utilizado para determinar la composición del biogás (inóculo²) tuvo un %ST y %SV de 3.77 y 3.13 respectivamente, esta relación (%SV/%ST) indica la biomasa activa en el lodo, por tanto, entre más cercana a 1, mayor su actividad microbiana, en este caso se obtuvo una relación de 0.83. El pH del inóculo fue 7.87, el cual es apropiado para el proceso y que contribuye a equilibrar el pH de los digestores con sustratos ligeramente ácidos como el caso de la FORSU. Para efectos de análisis no se tuvo en cuenta la influencia de tipo de inóculo debido que el ensayo se realizó únicamente para conocer la composición del biogás de los sustratos en MoDA.

Tabla 3-2. Composición físico química de la FORSU, pseudotallo, raquis e inóculo para ensayos de degradabilidad.

Medida (%)	DCC	CFV	FORSU	P	R	Inóculo ¹	Inóculo ²
pH	4.03±0.00	6.59±0.02	5.20±0.05	6.66±0.02	6.03±0.08	7.85±0.05	7.87±0.02
I (mg CaCO ₃ /L)			NA	NA	NA	2 596	1 958
Próximo							
H	70.415±0.48	83.84±2.82	83.42±0.50	93.82±0.34	93.05±0.34	98.35±0.05	96.23±0.08
ST	23.59±0.48	16.16±2.82	16.58±0.50	6.18±0.34	6.95±0.34	1.65±0.05	3.77±0.08
SV	95.56±0.09	93.12±2.53	91.86±0.12	67.76±0.66	83.12±0.84	63.62±0.43	91.08±0.24
SV _{bh}	22.54±0.46	15.02±2.22	15.23±0.47	4,19±0.27	5.78±0.34	1.05±0.03	3.13±0.08
Ce	8.88±2.53	5.44±0.09	8,14±0.12	32.24±0.66	16.88±0.84	36.38±0.43	8.92±0.24
Último							
C	45.60	42.53	45.70	35.50	33.20	31.23	33.50
N	3.31	2.35	2.81	0.74	0.74	4.53	4.15
H	6.10	6.45	6.70	5.10	4.70	5.10	5.87
S	0.39	0.29	0.31	0.08	0.15	1.27	1.01
C/N	13.77	18.09	16.26	47.97	44.86	6.89	8.07
Bioquímico							
Lignina	NA	NA	3.17±0.76	8.60±0.02	10.9±0.49	NA	NA
Glucanos	NA	NA	40.50±0.47	43.55±0.20	26.91±0.91	NA	NA
Hemicelulosa	NA	NA	4.51±0.057	9.37±0.04	11.77±0.22	NA	NA
Proteínas	NA	NA	15.87±3.00	1.62±0.00	1.78±0.03	NA	NA
Grasas y aceites	NA	NA	10.28±1.31	1.47±0.11	1.94±0.00	NA	NA

Nota: DCC (desechos de comida cocinada), CFV (cáscaras frutas y verduras crudas), inóculo¹ (lodo primario proveniente de una PTAR), inóculo² (lodo granular proveniente de una PTAR). ±desviación estándar

3.3.2 Ensayos de monodigestion y rendimiento de metano

Los resultados presentados en esta sección son potenciales de metano. Para obtener estos resultados se usó el equipo AMTPS II el cual como se explicó en la sección 3.2.2 solo determina contenido de metano.

Las curvas exponenciales obtenidas en los ensayos presentadas en litros normales por kilogramos de sólidos volátiles (NL/kgSV) se muestran en la

Figura 3-4. De acuerdo a la composición bioquímica, la FORSU tuvo la mayor producción de metano. El máximo potencial neto (sin la influencia del inóculo) de metano para la FORSU, P y R fue 929.1, 635.9, y 356.8 NmL_{CH₄} en un periodo de 28, 30 y 30 días respectivamente.

Los rendimientos de metano para la FORSU, P y R fueron 534.5 L/kg SV, 363.2 L/kg SV (248.5 L/kg ST) y 202.2 L/kg SV (171.0 L/kg ST) respectivamente.

El valor obtenido para P fue 4.5% superior al registrado por Kamdem durante una DA de 35 días (347 L/kg SV) utilizando un tamaño de partícula de 20 mm, T de 37 °C y $SV_{\text{sustrato}}/SV_{\text{inóculo}}$ igual al utilizado en este estudio [25], y 30% superior al obtenido por Khan [89] (256 L/kg SV), Kalia [39] reportó 271 L_{biogás}/kg ST de P con 4% ST.

El R fue 60% superior al obtenido por Calero (80 L/kg SV) a 37 °C, $SV_{\text{sustrato}}/SV_{\text{inóculo}}$ de 0.5 y C/N de 26 [112]. Los rendimientos de metano obtenidos para los residuos de cosecha de banano crudos (RCB_C) fueron mayor a los obtenidos con otras biomásas lignocelulósica, Kainthola reportó para la paja de arroz 170 L_{CH₄}/kg SV [113], y 216.8 L_{CH₄}/kg SV para el rastrojo de maíz [114].

En el caso de la FORSU, el rendimiento alcanzado en este trabajo fue 7% superior al reportado por Kumar (500 L/kg SV) utilizando FORSU separada en la fuente [115]. Es importante mencionar que debido a la heterogeneidad de la FORSU en la literatura se encuentran datos muy dispersos como por ejemplo rendimientos de 184.8 L/kg SV, y 250.8 L/kg SV [80], [116].

La producción diaria de metano de la FORSU fue alta los primeros 9 días con tres picos alcanzando el 90% de su producción total. El P tuvo dos picos, al tercer y quinto día en donde alcanzó el 40%

de la producción total, el 90 % se logró a los 21 días. El R presentó dos picos, al segundo y cuarto día donde obtuvo el 46 % de su producción total, el 90 % lo logró a los 18 días.

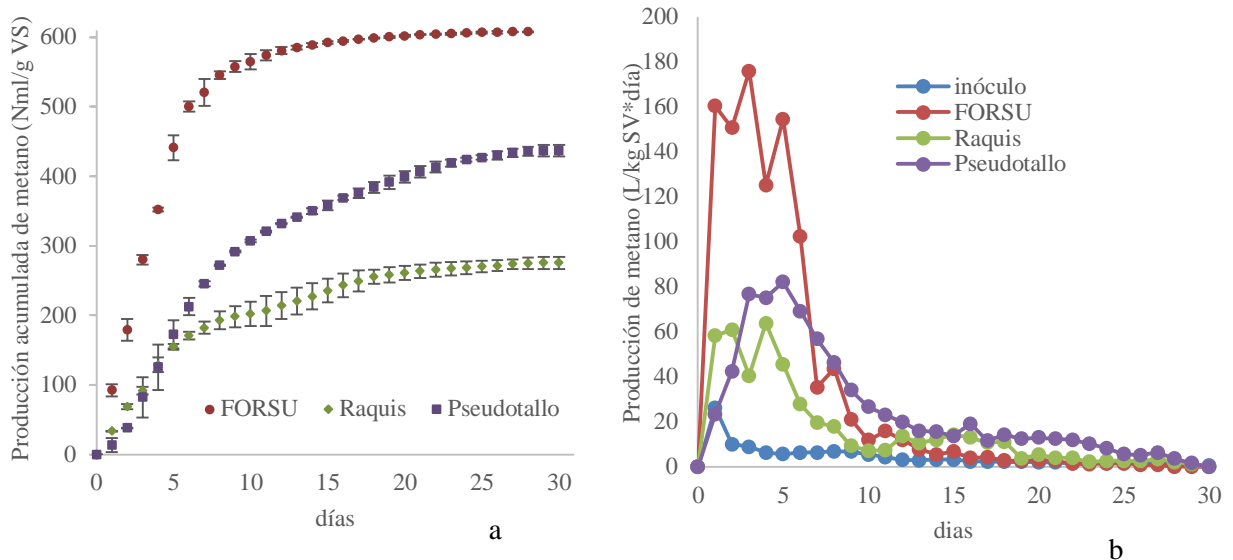


Figura 3-4. Curva exponencial de producción acumulada de metano de la FORSU, pseudotallo y raquis en un ensayo de digestión anaerobia a 37°C. (a). Producción de metano diaria en ensayos de monodigestión (b). Nota: Los valores incluyen la influencia del inóculo en ambas gráficas.

Los parámetros de control como SV, ST, pH, NTK y FOS/TAC se realizaron por triplicado al inicio y al final sobre el reactor replica seleccionado para el muestreo. En todos los casos se observó una reducción en ST y SV. El valor del FOS/TAC fue similar al inicio y al final del ensayo debido a que la carga orgánica en los ensayos *batch* es bajo, el valor entre 0.2-0.3 describe una carga orgánica muy baja. El pH bajo ligeramente pero se mantuvo en el rango recomendado para la DA (>6.5, <8.0). El NTK bajo ligeramente para la FORSU y P, el R aumento ligeramente. Los valores exactos de los parámetros de control se registran en la Tabla 3-3 y Tabla 3-4.

Tabla 3-3. Caracterización físico química al inicio del ensayo de degradabilidad

Muestra	ST (%)	SV (%)	FOS/TAC	pH	NTK (%)
OFMSW	2.66±0.09	1.76±0.05	0.63	7.14±0.04	0.25±0.00
P	2.18±0.02	1.90±0.04	0.28	7.68±0.01	0.24±0.00
R	2.23±0.03	1.29±0.02	0.27	7.79±0.00	0.18±0.01

Tabla 3-4. Caracterización físico química al final del ensayo de degradabilidad

Muestra	ST (%)	SV (%)	FOS/TAC	pH	NTK (%)
OFMSW	2.17±0.01	1.44±0.02	0.39	6.69±0.05	0.26±0.01
P	1.80±0.03	1.70±0.02	0.27	7.5±0.04	0.21±0.00
R	1.93±0.02	1.20±0.03	0.27	7.40±0.08	0.23±0.00

Se calculó el contenido energético de cada biomasa de acuerdo a la fórmula de Buswell-Mueller [104] y se comparó con el rendimiento obtenido experimentalmente con el propósito de calcular las aproximaciones a los valores teóricos, los cuales se basan exclusivamente en la composición elemental. El valor experimental de la FORSU fue 30 % inferior al teórico, para el P fue 20 % inferior y para el R 47 % inferior (ver Tabla 3-5). La FORSU debido a su alto contenido de nitrógeno puede inhibirse por la alta producción de amonio, este tipo de inhibición ya se ha reportado en investigaciones previas [108]. En el caso del P y R la relación C/N es demasiado alta, tienen poco contenido de nitrógeno siendo insuficiente para el adecuado crecimiento microbiano [62], [117]. La reducción de ST y SV fue superior para la FORSU siendo este sustrato con alta degradabilidad. El P tuvo una reducción del 24% y el raquis del 30%. Esto es posible por el mayor contenido de glucanos, y menor porcentaje de lignina del P con respecto al R (ver Tabla 3-2).

Los rendimientos experimentales de FORSU, P y R fueron 534, 456 y 384 L_{CH_4}/kg (a condiciones STP) VS respectivamente, lo que es equivalente a una producción de energía eléctrica (EE) de 301, 56 y 43 kWh por cada tonelada de material fresco. Pan *et al.* reportó un rendimiento de metano de P pretratado mediante un proceso de prensado de 11.6 m^3 equivalente a 46.6 kWh [92], 17 % inferior al que se obtuvo en este estudio.

Tabla 3-5. Rendimiento de metano teórico y experimental en los ensayos de degradabilidad de la FORSU, P y R

Ensayo	C/N	Teórico (L_{CH_4}/kg SV)	Experimental ($L_{CH_4}/kgVS$)	Reducción de SV (%)	EE (kWh/t_{bh}^a)
FORSU	16.26	763.35	534.52±0.25	34.34±2.14	301.20
P	47.97	456.68	363.29±3.39	18.33±3.05	56.32
R	44.86	384.21	202.19±3.59	25.79±1.38	43.26

NOTA: ^a Energía eléctrica por tonelada de materia fresca. ± desviación estándar.

Estadísticamente los resultados de los rendimientos experimentales de metano no representan una diferencia significativa. Los datos se evaluaron con la prueba no paramétrica de Kriskal Wallis, del cual se obtuvo un p de 0.1017.

3.3.3 Análisis de cinética

La cinética de degradación fue evaluada de acuerdo a la descripción hecha en la sección 3.2.6. La Tabla 3-6 reúne los valores obtenidos de la linealización (ver Anexo A) de los datos de producción de metano acumulada y tiempo. La tasa de degradación k_0 fue mayor para la FORSU. Shamurad [118] reportó 0.14 d^{-1} para la FORSU compuesta por 79% de desechos de comida cocinados, 20% de desechos crudos de frutas y vegetales y 1% de paquetes de cartón. De la Rubia obtuvo un k_0 de 0.52 d^{-1} , 50% superior al obtenido en este estudio [119]. Nielfa [120] obtuvo 0.24 d^{-1} , similar al calculado en este estudio. La k_0 del P y R fue similar, con una diferencia del 0.6 %. A pesar de que el rendimiento de metano de P fue mayor al de R, en la Figura 3-4 (b) el P y R presentaron dos picos dentro de los primeros 5 días, y se consiguió el 90 % de la producción de metano en casi el mismo tiempo, 18-20 días. El k_0 de P y R fue 39 % inferior al de la FORSU.

Tabla 3-6. Valores de la tasa específica de degradación obtenida en las monodigestiones

M	C/N	k_0 (days⁻¹)	R^2	R^2 ajustada
OFMSW	16.26	0.262±0.00	0.98±0.00	0.94±0.00
P	47.97	0.158±0.00	0.97±0.02	0.93±0.02
R	44.86	0.157±0.00	0.94±0.05	0.90±0.05

3.3.4 Composición del biogás

El porcentaje de metano máximo alcanzado en los ensayos de MoDA de FORSU, P y R fue 78, 71, y 65% respectivamente (ver

Tabla 3-7). Considerando la información de la Figura 3-4 la máxima producción de metano se obtuvo a los 3, 4 y 5 días, y el 90% de la producción a los 8, 17 y 19 días para FORSU, P y R respectivamente. Por lo tanto, es conveniente un tiempo de retención hidráulica (TRH) entre 10 y 20 días. El THR es un valor importante para dimensionar el digester, varía significativamente dependiendo el tipo de reactor anaerobio. En reactores UASB el THR puede ser de horas a pocos días y en reactores CSTR de 15 a 20 días a condiciones mesofílicas [55].

Por otro lado, el contenido de H₂S en los ensayos de MoDA de FORSU fue alto, se obtuvo valores hasta de 8029 ppm mientras que el P y R presentó concentraciones de 185 y 315 ppm respectivamente; esto se debe a la alta o baja concentración de azufre en cada biomasa. Cuando el biogás tiene por encima de 200 ppm de H₂S es necesario purificarlo por razones técnicas [121]. Sin embargo, por razones ambientales y de salud se debe remover el H₂S hasta 10 ppm. El Instituto de Salud y Seguridad Ocupacional de Estados Unidos (NIOSH) recomienda un nivel de exposición máximo en el aire de 10 ppm y la Administración de Salud y Seguridad Ocupacional (OSHA) recomienda 10 ppm/ 8 h o 15 ppm/ 15 min. La concentración letal baja (LC_{Lo}) es de 600 ppm/30 min.

Tabla 3-7. Composición semanal promedio del biogás en los ensayos de monodigestión

		CH ₄ (%)	CO ₂ (%)	O ₂ (%)	H ₂ S (ppm)	Balance (H ₂ O, H ₂ , N ₂) (%)
FORSU	1	37±1.12	50±0.55	2.0±0.02	182±1.85	12
	2	71±1.50	18±0.81	1.0±0.03	3564±2.32	11
	3	75±1.84	14±1.21	0.5±0.01	5878±2.54	10
	4	78±1.00	12±0.92	0.1±0.02	8029±1.96	10
P	1	35±2.54	54±1.10	1.5±0.05	20±2.98	9
	2	70±3.12	21±1.23	0.0±0.06	65±3.01	8
	3	71±1.79	22±0.95	0.8±0.05	151±1.74	8
	4	68±2.63	25±1.40	0.0±0.08	287±3.14	7
R	1	21±1.85	70±1.16	2.1±0.09	31±2.05	7
	2	61±1.62	31±1.84	0.9±0.01	75±2.41	8
	3	65±3.11	26±1.75	0.5±0.02	180±3.56	9
	4	60±2.45	30±1.44	0.0±0.00	315±2.87	10

3.3.5 Análisis de azufre

Dada la importancia del contenido de azufre (S) en los procesos de digestión anaerobia, se llevó a cabo un análisis de azufre para la FORSU (utilizada en la segunda parte experimental) por ser este el sustrato con mayor contenido de este elemento (0.31 %). Es verdad que la DA de la FORSU está bien establecida por la cantidad de investigaciones a su alrededor y la importancia de esta biomasa en procesos biológicos, no obstante, la alta concentración de sulfuro de hidrógeno (H₂S) en la

fermentación anaerobia representa una inhibición disminuyendo el contenido de CH_4 y problemas en el uso del biometano. Durante los ensayos experimentales se observó altas concentraciones de H_2S tanto con el sustrato proveniente de la cafetería del edificio de la facultad de medicina de la Universidad Nacional de Colombia (Bogotá) como del sustrato que se recogió en la cafetería del CIEMAT. Existen diversos métodos de remoción de H_2S como químicos y biológicos, sin embargo, una adecuación más al proceso implica más costos.

Para realizar el análisis inicialmente se seleccionó categorías de mezclas de verduras, frutas, granos, productos lácteos, carnes, entre otros. Se determinó que las categorías de verduras y carnes reportaron los mayores contenidos de azufre (S) con 0.6 y 0.75 % respectivamente. Posteriormente, y con el fin de obtener información específica, estas categorías se desglosaron. Los resultados arrojaron porcentajes de azufre para rúgula, ajo y brócoli de 1.9, 0.97 y 0.75 % respectivamente. En el caso de las carnes el orden fue 0.92 , 0.88 y 0.88 % para pollo, carne de res, y pescado (ver Figura 3-5).

Estos resultados son netamente informativos y no fueron tratados en este estudio. Sin embargo, es un campo que aún falta por explorar ya sea para el tratamiento de H_2S o la eliminación automática en las plantas de DA de los alimentos con mayor contenido de S.

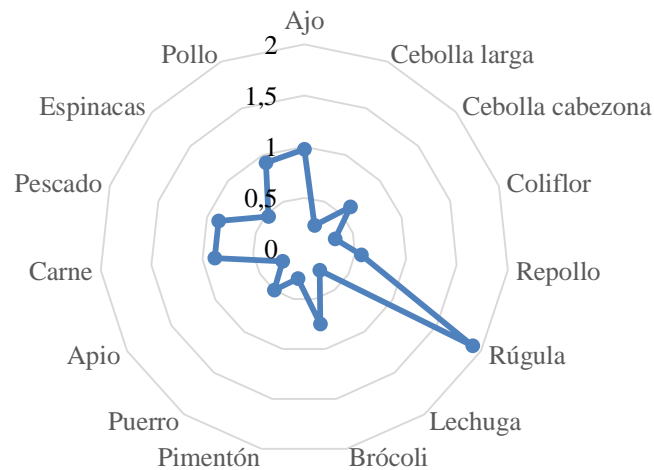


Figura 3-5. Porcentaje de azufre en diferentes muestras de alimentos.

3.4 Conclusiones

De acuerdo al estudio de monodigestión de FORSU, P y R se concluye lo siguiente:

La fracción orgánica de residuos sólidos urbanos (FORSU) es una biomasa abundante y disponible, con diversas propiedades favorables para los procesos biológicos como la digestión anaerobia dado su alto contenido de carbohidratos, proteínas y lípidos. Tuvo un rendimiento de metano máximo de 534.52 L_{CH_4}/kg SV, siendo posible generar 301.20 kWh/ t_{bh} de electricidad. No obstante, el rendimiento de metano puede mejorarse al digerirlo junto a otros sustratos con mayor relación C/N con el propósito de ajustarlo al recomendado para estos procesos. Asimismo, es una biomasa con alto contenido de azufre dando lugar a elevadas concentraciones de H_2S en el biogás, lo cual puede provocar una inhibición en el proceso y posible incremento en los costos de producción.

La utilización del P de la especie *Musa acuminata* para la producción de metano es una biomasa prometedora. El PBM del P fue de 363.29 L_{CH_4}/kg SV, equivalentes a 56.32 kWh/ t_{bh} . Este rendimiento es superior al de otras biomásas lignocelulósicas, sin embargo, se recomienda la CoDA con otros sustratos como la FORSU con el fin de ajustar la relación de C/N al rango 20-30. Se destaca de esta biomasa residual su bajo contenido de azufre que se traduce en baja concentración de H_2S en el biogás, siendo una ventaja frente a otros sustratos debido a que por encima de 200 ppm de H_2S es necesario retirarlo.

El rendimiento máximo de metano de la monodigestión de R de la especie *Musa acuminata* fue el más bajo de los sustratos estudiados, se obtuvo 202.19 L_{CH_4}/kg SV equivalente a 43.26 kWh/ t_{bh} . Esta biomasa no tiene un uso actual masivo, sin embargo, su disponibilidad es aproximadamente el 5% de la del P, por lo tanto, no podría usarse como único sustrato en zonas de baja densidad de este cultivo. Al igual que el P, es una biomasa residual con bajo contenido de azufre y alta relación C/N.

En general, las tres biomásas estudiadas tienen un potencial metanogénico suficiente para cubrir las necesidades energéticas de una familia o un grupo de familias. Su análisis estadístico no arroja ninguna diferencia significativa entre ellas; en orden de mayor a menor por su rendimiento de metano se obtuvo: FORSU, P y R.

4 Codigestión anaerobia de los residuos de cosecha de banano pretratados por explosión con vapor y la FORSU

4.1 Introducción

La biomasa es la cuarta fuente más grande del mundo después del petróleo, el carbón y el gas natural (GN) [3]. En otras palabras, es el recurso renovable más abundante en la Tierra. Los residuos agrícolas como el pseudotallo (P) y raquis (R), y los desechos orgánicos de comida -FORSU son materias primas promisorias para la producción de biogás y metano dada su alta disponibilidad y bajo costo. Además se reduce el impacto causado por su disposición final no adecuada [122]. El biogás se considera un biocombustible de segunda generación y con propiedades similares a las del GN cuando se purifica a biometano (GN) [28]. El GN es el combustible fósil con menor huella de carbono [123], esta característica ha impulsado el uso intensivo en el país, como parte de las acciones para mitigar el cambio climático, sin embargo las reservas alcanzarían hasta el año 2023 [124]. Por lo tanto, el desarrollo de la tecnología del biogás y biometano en Colombia debe considerarse como una estrategia para alargar la vida útil de estas reservas, mediante del uso de biometano en mezcla y futuro sustituto del GN.

Por un lado, la digestión anaerobia (DA) de la FORSU es un proceso bien establecido por toda la investigación que hay alrededor de ella. Dependiendo de su composición puede ser un sustrato con baja o alta degradabilidad. La FORSU puede usarse para aumentar el rendimiento de metano de otros sustratos con baja degradabilidad en monodigestion, o digerirse en codigestion con otros sustratos que mejoren el balance de nutrientes en la mezcla y se produzca un efecto sinérgico.

Por otro lado, la digestión de los RCB apenas se ha considerado a pesar de que en el mundo se producen más de 120 millones de toneladas de banano y plátano al año [19]. Colombia participa con cerca del 2 % de la producción mundial [15]. En el año 2017 se registró un área sembrada y una producción nacional total de banano de 414 556 ha y 3 911 054 toneladas respectivamente [15]. Se considera que por cada tonelada de banano producido se generan de 3-5 t de biomasa lignocelulósica fresca (P y R) [20]. Esto se debe a que la planta de banano fructifica solo una vez en su vida, en consecuencia, una vez se toma el racimo se tumba o en ocasiones se deja, pero sin ser este productivo nuevamente. Estos residuos son materias primas subutilizadas y con alta disponibilidad.

La biomasa lignocelulósica como los RCB está compuesta por celulosa, hemicelulosa y lignina que en conjunto forman una estructura rígida y compacta, esto la hace una biomasa recalcitrante a la biodegradación. Para alterar esta estructura es necesaria una etapa previa en la cual la celulosa y hemicelulosa queden expuestas fácilmente al ataque microbiano. A nivel laboratorio se ha experimentado pretratamientos mecánicos, fisicoquímicos, biológicos y químicos, pero solo hay reporte de unos pocos que pueden ser rentables a nivel industrial como el pretratamiento de explosión con vapor [47].

La explosión con vapor (SE por sus siglas en inglés *Steam Explosion*) ha sido ampliamente estudiado para mejorar la disponibilidad biológica de diversos materiales lignocelulósicos, especialmente para la producción de biocombustibles líquidos [125]. Durante la SE, se aplica alta presión, y en consecuencia alta temperatura durante un tiempo controlado (generalmente de segundos a minutos) mediante el uso de vapor saturado, seguido de una disminución repentina de la presión, lo que provoca una descompresión explosiva que conduce a la desintegración de los componentes estructurales de la lignocelulosa. La SE posee diversas características ambientales como bajo consumo de energía, menor inversión de capital, bajo o nulo uso de químicos y alta recuperación de azúcares [126], [127]. Por estos distintivos se seleccionó como el pretratamiento en este estudio. La SE ha sido estudiado previamente para mejorar la accesibilidad del contenido lignocelulósico de los RCB [25], [110]. Kamdem [26] evaluó la SE catalizada con ácido para la producción de azúcares fermentables de P y R destinados a la producción de bioetanol. En ambos casos, el pretratamiento con SE catalizado con ácido fue efectivo. Kamdem [26] demostró que SE también puede mejorar la producción de biogás a partir de RCB secos, con una ligera mejora entre 8 y 12.7% para la fracción sólida y líquida de RCB obtenida después de SE.

Existe poca literatura científica sobre la influencia del pretratamiento de SE en la composición química de P y R húmedos, y el uso de este tipo de pretratamiento para mejorar la producción de biogás a partir de RCB secos solo se ha evaluado en un estudio. Además, la codigestión (CoDA) de RCB y la FORSU no se ha estudiado antes, a pesar de las ventajas que pueden existir en lugares con alta densidad de cultivo de banano. Por lo tanto, el objetivo de este estudio fue evaluar la CoDA de la FORSU y RCB para la producción de biogás y biometano, estudiando al mismo tiempo la SE como pretratamiento para aumentar la biodegradabilidad de los RCB.

4.2 Metodología

4.2.1 Sustratos e inóculo

▪ Sustratos

La Fracción Orgánica de Residuos Sólidos Urbanos (FORSU) fue separada en la fuente, es decir en su lugar de origen para evitar la contaminación con otros residuos cuando se mezcla en los contenedores de la basura. La FORSU fue proporcionada por el restaurante del CIEMAT, el material orgánico fue seleccionado aleatoriamente y no fue combinado con ningún otro desecho del restaurante, se excluyeron las servilletas y huesos por considerarse interferentes en el proceso. Las servilletas normalmente se encontraban untadas con labial, los cuales de acuerdo a su procedencia pueden contener pigmentos, aceites minerales, o ceras no biodegradables. En adición, las servilletas dentro de su fabricación pueden contener blanqueadores tóxicos. Por su parte, los huesos se excluyeron por su difícil procesamiento sobre todo los de gran tamaño y por ser un material con una tasa de degradación lenta.

Los residuos orgánicos se recolectaron manualmente durante una semana (de lunes a viernes) para aumentar la representación de la muestra, cabe mencionar que estos residuos están condicionados a la dieta española por ser el lugar de procedencia. Durante cada día de recolección se procesó la muestra. Las partes más duras del FORSU como algunas cáscaras de frutas y vegetales fueron cortadas en pedazos con dimensiones de 20mm*20mm*20mm (ver Figura 4-1). Las fracciones más suaves como comida cocida se licuaron en una licuadora. Al final las dos partes se mezclaron y se licuaron nuevamente, se obtuvo un material con aspecto lodoso. Posteriormente fue almacenada a 4°C para evitar su descomposición. Al final de la semana, el material procesado durante los 5 días se combinó utilizando el método de cuarteo descrito por Hernández *et al.* [95] con el fin de crear una sola muestra y ser analizada.

Como primera aclaración sobre la muestra de la FORSU analizada, esta fue compuesta principalmente por cáscaras, tallos y hojas de vegetales y frutas crudos, y residuos de fruta y comida cocida que quedaron en los platos (ver Figura 3-1). Esto con el fin de no competir con los alimentos cocidos no utilizados y que son destinados para el servicio comunitario.

El P y R pertenecientes a la planta de la especie *Musa acuminata* se recolectaron en Gáldar, un municipio en el norte de Gran Canaria (Islas Canarias, España), un sitio con una alta extensión en

cultivos de banano o plátano. El material se congeló y se transportó en avión a Madrid para su utilización. Consecutivamente, se sometieron a una reducción de tamaño de partícula hasta 18-20 mm (ver Figura 4-1). Investigaciones previas registran mayor rendimiento de metano a tamaños de partícula de 20mm que a 5 o 10mm, su explicación se ha relacionado por la estructura morfológica del P. Los tejidos dermales del P tienen una epidermis bien definida con radiales alargadas, células anchas. Cuando el P se reduce de tamaño el jugo concentrado de las células oblongas se pierde, por ende, cuanto menor es el tamaño de partícula mayor jugo orgánico se pierde [88], [128].

El P y R son considerados biomasa lignocelulósica, sin embargo, es una biomasa con contenido de lignina inferior a otras como paja de trigo, rastrojo de maíz y biomasas leñosas. Con el fin conseguir un aumento en el rendimiento de metano se sometieron a un pretratamiento con explosión de vapor en una planta piloto descrita en el numeral 4.2.4. Las condiciones del pretratamiento se seleccionaron con base en investigaciones previas utilizando material similar y la misma planta piloto de explosión con vapor [24], [129]. Al igual que la FORSU, los residuos de cosecha de banano (RCB) se almacenaron a 4°C para su posterior análisis.

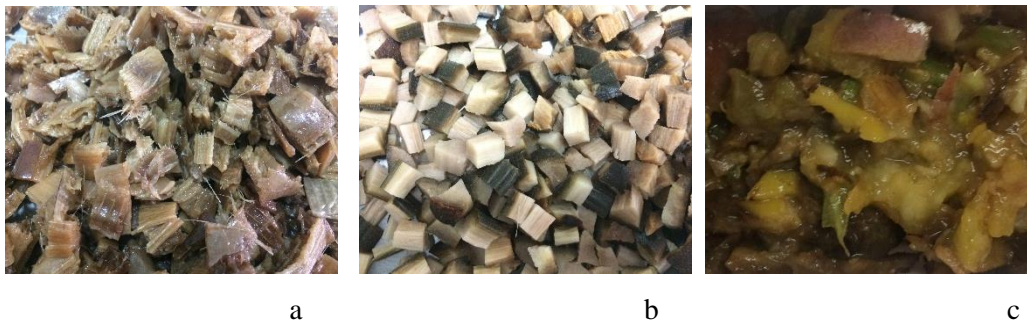


Figura 4-1. Sustratos adecuados (reducción de tamaño de partícula) para su utilización en los ensayos de codigestión. a (pseudotallo), b (raquis), c (fracción orgánica de residuos sólidos urbanos – FORSU)

- Inóculo

El inóculo seleccionado fue un lodo anaerobio proveniente del digester anaerobio de una PTAR que funciona a 37 °C y realiza DA húmeda en Madrid. El lodo fue sometido a un tratamiento de predigestión durante 4 días a la temperatura del proceso con el fin de reducir al máximo la producción endógena de biogás. Cuando se realizan ensayos *batch* (hecho en este estudio) las características del inóculo determinan gran parte del ensayo, a diferencia de los ensayos semicontinuos o continuos donde las características van cambiando conforme avanza el ensayo.

4.2.2 Método experimental

- Ensayos de biodegradabilidad- codigestion

A través de los ensayos de biodegradabilidad se espera conocer la idoneidad de una mezcla de sustratos (codigestión) para su uso en proceso de DA. Estos ensayos consisten en conocer su máxima producción de biogás y metano a través del conocido potencial de biometano (PBM). El PBM consiste en un ensayo *batch* o discontinuo en el cual el sustrato se dispone en un reactor anaerobio durante 30-40 días o hasta el punto en el que se registre un aumento inferior al 1% en la producción de biogás y metano. Durante el ensayo no se ejerce ninguna acción sobre los reactores, solo se controla la agitación y la temperatura.

Debido a que la CoDA de FORSU-P-R sin y con pretratamiento de la biomasa lignocelulósica no se ha reportado en la literatura científica hasta el momento, los ensayos de degradabilidad se realizaron siguiendo protocolos internacionales como la norma VDI 4630 de la *Verein Deutscher Ingenieur* (Asociación Alemana de Ingenieros) [130] con el fin de entregar datos comparables para futuras investigaciones. Dentro de las recomendaciones más importantes de la norma y seguidas en este estudio se destacan:

- Realización por duplicado o triplicado de cada ensayo.
- Reactores de referencia o blanco, se utilizaron 3 reactores con solo inóculo para extraer la producción endógena del lodo sobre las codigestiones.
- Reducción de tamaño de partícula de los sustratos.
- Utilización de un inóculo apropiado. Con apropiado se refiere a un inóculo que ha estado en contacto con el sustrato a digerir, pero que cuando no se tenga se realice con un lodo de una PTAR, ya que estos han estado en contacto con diferente material orgánico y por tanto cuentan con una biocenosis diversificada.
- Predigerir el inóculo a la temperatura (37 °C) del proceso de DA al menos 4 días para reducir la producción endógena de metano.
- Purgar con nitrógeno gaseoso (N₂) al inicio del ensayo todos los reactores para asegurar condiciones anaerobias.
- Mantener un mismo patrón de agitación sobre los reactores, esta agitación fue semicontinua.
- Alimentar el reactor teniendo en cuenta una relación de $SV_{\text{sustrato}}/SV_{\text{inóculo}} = 0.5$.

- Asegurar una concentración de sólidos volátiles inferior al 10% con el propósito de garantizar buen contacto biomasa-inóculo.
- Un indicador de calidad del inóculo está relacionado con su contenido de sólidos volátiles (SV) y sólidos totales (ST). Los SV deben ser igual o superior al 50% del contenido de ST. El contenido de SV en el inóculo hace alusión a la proporción de microorganismos en el medio. Esta medida no discrimina entre bacterias vivas o muertas, en consecuencia, se utiliza la relación SV/ST como indicador de la biomasa activa en el lodo.

Esta norma alemana es ampliamente aceptada a nivel internacional en el campo de la DA. Como principal dificultad en la literatura científica se observa la comparación de resultados debido a la diversidad de metodologías utilizadas. Como solución, esta norma se creó para unificar las metodologías y hacer los resultados de diferentes grupos de investigación comparables.

- Equipo de digestión AMPTS II

Para llevar a cabo la experimentación se utilizó el equipo AMPTS II, es un equipo para realizar análisis de potencial de metano. Ver la descripción del numeral 3.2.2 *Método experimental*.

- Proceso experimental

El proceso comienza con la recolección y posterior adecuación de los sustratos e inóculo (ver sección 4.2.1). Posteriormente se realiza una homogenización de los sustratos por separado. Los sustratos sólidos pasan por un proceso de reducción de tamaño de partícula, o licuado para conseguir una pasta homogénea como el caso de la FORSU. Este material se sometió a reducción de tamaño de partícula en una licuadora industrial.

Inmediatamente después de la reducción de tamaño de partícula, el P y R se someten a un pretratamiento con explosión con vapor (SE, por sus siglas en inglés *Steam Explosion*) a las condiciones establecidas de temperatura y tiempo de residencia. El lodo procedente del pretratamiento se analiza para conocer la recuperación de sólidos insolubles en agua (SIA) y sólidos solubles en agua (SSA) y la respectiva recuperación de azúcares en cada fracción (sólida y líquida). Ambas fracciones son utilizadas para la producción de metano.

Consecutivamente se realizó la caracterización de los sustratos (FORSU, P pretratado y R pretratado) mediante análisis próximo para conocer los SV, y ST. El parámetro de SV fue utilizado para calcular la alimentación de sustrato e inóculo al reactor de acuerdo a la relación de $SV_{\text{sustrato}}/SV_{\text{inoculo}}$ seleccionada para el ensayo. Los datos de SV y ST en el inóculo también son un indicador de calidad.

El análisis elemental también se llevó a cabo para determinar la conveniencia de la CoDA con base en la relación de C/N. Finalmente se realizó el análisis bioquímico en todas las biomásas para conocer la recuperación de azúcares después del pretratamiento de SE.

Tras los análisis, el inóculo se sometió a un proceso de predigestión durante 4 días a las condiciones seleccionadas del ensayo de DA.

Después de la predigestión, se realizan las mezclas de acuerdo a los SV de los sustratos e inóculo. La proporción de sólidos volátiles de las codigestiones con material pretratado se ajustó para obtener una relación de C/N de 20 en la mezcla, siendo este valor apropiado para el proceso de DA. Para conseguir esa relación el valor máximo de FORSU es del 70 % de SV, por ende, se estableció este valor dado que la FORSU es el sustrato con mayor degradabilidad. El 30 % restante se dividió entre el P y R. De acuerdo a su proporción en la planta (ver Figura 2-4) y que una parte del R se pierde en el racimo, se estableció 28 % para P y 2 % para R. Para el caso de la mezcla FORSU-P-R (P y R crudos) los porcentajes de SV fueron 60, 37.5 y 2.5 % respectivamente. Bajo estos valores se consigue una relación de C/N de 20.

Posteriormente se alimenta el reactor con las cantidades máxicas calculadas, y se realiza una purga con gas nitrógeno en la cabecera del reactor para garantizar condiciones anaerobias desde el principio del ensayo con el propósito de eliminar las posibles fases de degradación aerobias que se reflejan en una disminución de la producción de biogás. Una vez se realiza la purga los reactores se sellan, se sumergen en el baño termostático y se prende el sistema de mezclado. Tras 2 minutos de mezclado se realiza el muestreo sobre los tres reactores utilizados para la misma mezcla. Existen muchas maneras de realizar el muestreo, una forma es como se describió en el procedimiento experimental del capítulo 3, otra manera es como la que se llevó a cabo en este capítulo, otros autores no realizan ningún muestreo al inicio, sino que determinan los datos teóricamente. Cualquiera de los tres métodos es válido, depende en un principio de la destreza del investigador y se aprueba con coeficientes de variación inferior al 20 %. Para este caso, las muestras se realizaron por triplicado debido a que los 3 reactores fueron utilizados para el análisis al inicio y al final del ensayo. La masa extraída en cada reactor fue contabilizada para realizar el ajuste sobre el rendimiento de metano.

Una vez el montaje experimental está listo y todas las unidades están conectadas se da inicio al ensayo de biodegradabilidad. El ensayo duró entre 26-38 días teniendo en cuenta la producción de biogás, cada ensayo se dio por terminado cuando la diferencia en la producción diaria de metano fue inferior al 1%. Durante el ensayo la temperatura y la agitación se mantuvieron constantes y no hubo

ninguna acción sobre los digestores. Al final del ensayo, se realizó el análisis próximo de SV, ST sobre los tres reactores utilizados al inicio para el mismo análisis.

4.2.3 Diseño experimental

El fundamento de este diseño de experimentos fue evaluar el efecto de la CoDA de FORSU, P, y R considerando las condiciones del pretratamiento de explosión con vapor para P y R. Los números al lado de cada letra (P, R) representan la temperatura a la cual fueron pretratados, teniendo en cuenta que el tiempo de residencia en el SE fue de 10 min para todos los casos (ver Tabla 4-1). La P y R que no tienen número se refiere al material sin pretratar.

Estas codigestiones pueden ser analizadas de dos formas, primero reducir una posible inhibición por amonio causada por el alto contenido de nitrógeno en la FORSU aumentando la relación C/N con la CoDA de P y R (pretratado). Segundo, aumentar la biodegradabilidad del P y R al ser sometidos a explosión de vapor como pretratamiento y en CoDA con un sustrato con un rendimiento de metano superior. La CoDA de FORSU-P-R se realizó para conocer el efecto (expresado en producción de metano) del pretratamiento con SE. Con los resultados obtenidos se evaluó si hubo un efecto sinérgico o antagónico en el proceso. En otras palabras, el efecto sinérgico se evidencia cuando la producción de metano obtenido por CoDA es mayor a la producción de metano individual de cada uno de sus sustratos. El efecto antagónico se da cuando la producción de metano individual es mayor a la producción obtenida por la CoDA.

Las proporciones de SV fueron las mismas en todos los ensayos de CoDA dado que fueron asignadas teniendo en cuenta la disponibilidad, relación C/N y composición química del material. La relación de $SV_{\text{inóculo}} / SV_{\text{sustrato}}$ fue 0.5 de acuerdo a las recomendaciones de la norma VDI 4630. La relación C/N entre cada ensayo tuvo una diferencia inferior al 1%, esto se debe a que el material tiene similar contenido de C y N (ver Tabla 4-3), la relación ideal esta entre 20-30 por lo que los valores alcanzados se consideran aceptables. En el caso de la CoDA de FORSU-P-R el porcentaje de SV adicionados fue diferente para alcanzar la misma relación C/N de 20. La temperatura del proceso fue 37 °C, y la duración del proceso de DA en cada ensayo se dio por terminado cuando la producción de metano entre días consecutivos fuese inferior al 1%.

Tabla 4-1. Parámetros de los ensayos de codigestión de la FORSU, R y P crudo y R y P pretratado

M	FORSU (%SV)	P (%SV)	P160 (%SV)	P180 (%SV)	R (%SV)	R180 (%SV)	R200 (%SV)	SV _s /SV _I	C/N	T (°C)	t (días)
1	60	37.46	0	0	2.54	0	0	0.5	20.97	37	34
2	70	0	28.09	0	0	1.91	0	0.5	20.11	37	30
3	70	0	0	28.09	0	1.91	0	0.5	20.23	37	28
4	70	0	28.09	0	0	0	1.91	0.5	20.11	37	27
5	70	0	0	28.09	0	0	1.91	0.5	20.25	37	26

M: muestra, _s Sustrato, _I Inóculo.

4.2.4 Pretratamiento de la biomasa- explosión con vapor

El P y R se sometieron a un pretratamiento de explosión con vapor en una planta piloto de SE de 2 L descrita por Ballesteros *et al.* [129], [131]. El material se introdujo con un tamaño de partícula de 20 mm y húmedo. Las condiciones del SE para el material se basaron en la composición del material crudo e investigaciones previas que usaron el mismo material y planta piloto de SE. Estos estudios tuvieron como objetivo la producción de bioetanol. Los autores recomiendan intensificar la hidrólisis del SE con la adición de ácido sulfúrico, sin embargo, el propósito de este estudio fue alterar los compuestos estructurales de la biomasa para hacerla más accesible al ataque microbiano. Además, cuando se usa ácido el agua del SE debe tratarse.

El P y R se evaluaron por separado, la temperatura seleccionada para el P fue 160 y 180 °C y para el R 180 y 200 °C. El R se evaluó a temperaturas mayores por contener mayor contenido de lignina. El tiempo de residencia se mantuvo constante a 10 minutos para todos los tratamientos. Se llevaron a cabo 4 ensayos, 2 para cada material. La producción de metano fue seleccionada como respuesta del análisis.

Cada condición experimental se representó con el factor de severidad (FS), este unifica el tiempo (t, min) y la temperatura (T, °C) (ver Ecuación 4-1). Este valor permite comparar diferentes condiciones del pretratamiento.

$$FS = t \times \exp\left(\frac{T-100}{14.75}\right)$$

Ecuación 4-1

Donde FS es el factor de severidad, t el tiempo (minutos) y T la temperatura (°C).

Se introdujo 30.90 g y 34.75 g (en base seca, bs) de P y R respectivamente. Una vez el material está en el reactor se alcanza la temperatura de proceso y el tiempo se contabiliza automáticamente. Después de la explosión el lodo se recupera en un ciclón y se filtra para realizar el balance de masa y la recuperación de sólidos (RS) (ver Ecuación 4-2). La torta del filtrado se lava con agua destilada para eliminar cualquier compuesto soluble con el fin de evitar errores en la cuantificación de azúcares. Ambas fracciones fueron analizadas para conocer su composición de azúcares. Estas composiciones se refirieron al material crudo para evaluar el efecto del pretratamiento (ver Ecuación 4-3).

$$RS (\%) = \frac{SIA(g) + SSA(g)}{100 \text{ g biomasa}_{bs}} \quad \text{Ecuación 4-2}$$

Donde RS es la recuperación de sólidos, SIA los sólidos insolubles en agua y SSA los sólidos solubles en agua.

$$RG (\%) = \frac{G_{FL}(g) + \left(G_{SIA}(g) + \frac{SIA(g)}{100 \text{ g biomasa}_{bs}} \right)}{G_{bc}(g)} * 100 \quad \text{Ecuación 4-3}$$

Donde RG es la recuperación del compuesto de interés, G_{FL} es el compuesto de la fracción líquida, G_{SIA} es el compuesto en los sólidos insolubles en agua, SIA los gramos de sólidos insolubles en agua y G_{bc} el compuesto de la biomasa cruda o sin pretratamiento.

4.2.5 Métodos analíticos

Cada método analítico realizado en este estudio siguió protocolos reconocidos a nivel internacional y que además se han utilizado en investigaciones previas en el área de digestión anaerobia.

- Sólidos totales, sólidos volátiles, cenizas (ST, SV, Ce)

Los ST y SV se realizaron sometiendo la muestra de biomasa a un secado a 105 °C durante 24 horas o peso constante, y posterior calcinación a 550°C durante una hora de acuerdo a los propuesto por APHA [99].

- Nitrógeno total Kjeldahl (NTK)

El NTK se analizó por el método Kjeldahl utilizando un destilador Büchi Kjelflex y un titrador automático [101].

- pH

El pH se midió con un pH-metro, para las muestras líquidas la medición se hizo directamente sobre la muestra; en el caso de las muestras sólidas se diluyó 1:5 (muestra: agua), se agitó durante 2 horas y se realizó la medida de pH sobre el coloide resultante.

- FOS/TAC

La relación de ácidos grasos volátiles (FOS, por sus siglas en alemán *Flüchtige Organische Säuren*) y carbonato inorgánico total (TAC, por sus siglas en alemán *Totales Anorganisches Carbonat*) se determinó en el equipo FOS/TAC Hach TIM 840 [102]. Este incluye un test de valoración automático con H₂SO₄. La relación FOS/TAC es reconocida como valor guía para evaluar los procesos de DA.

- Análisis elemental (C,H,N,S)

El análisis elemental se llevó a cabo para calcular la relación C/N de cada sustrato y determinar su conveniencia en las CoDA. Asimismo, estos datos se utilizaron para el cálculo del rendimiento teórico de metano utilizando la ecuación de Buswell-Muller [132]. Se realizó utilizando un macroanalizador LECO TruSpec CHNS.

- Composición bioquímica

El análisis de glucanos, hemicelulosa y lignina se realizó siguiendo el protocolo de NREL [103]. La muestra de biomasa seca a 105 °C se mezcló con 3 ml de ácido sulfúrico y se colocó en un baño de agua a 30 °C durante 1 hora. Tras la hidrólisis la muestra se diluyó (4 % concentración del ácido) y se esterilizó en autoclave a 121 °C durante 1 hora. Una fracción de la hidrólisis se envió al laboratorio de cromatografía del departamento de biomasa del CIEMAT, en donde se analizó su contenido de azúcares por HPLC (por sus siglas en inglés *High Performance Liquid Chromatography*) utilizando una columna CARBOSep CHO-682 LEAD. La parte restante de la hidrólisis se utilizó para la determinación de lignina insoluble.

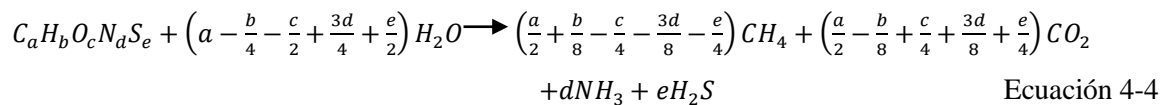
El contenido de proteínas se determinó por el método Kjeldahl utilizando un factor de conversión de proteínas del 6.25. Las grasas y aceites se determinaron mediante extracción Soxhlet utilizando éter de petróleo como disolvente.

- Sólidos solubles totales y sólidos solubles (SST, SS)

Los SST y SS se determinan para realizar el balance de masa del pretratamiento de explosión con vapor. Los sólidos solubles en agua de la fracción líquida del material pretratado se midió en una balanza de humedad por microondas Sartorius AG mediante la pérdida de peso de la muestra.

- Contenido energético

El cálculo de contenido energético se determinó teóricamente a partir de la composición elemental de la biomasa, se siguió el método y la ecuación planteada por Buswell-Mueller [104] (ver Ecuación 4-4).



- Energía de la biomasa

Se calculó la máxima energía que puede obtenerse de la conversión del metano procedente de la digestión anaerobia (ver Ecuación 4-5) [92].

$$E_{biomasa} = Y \times PCI \times \eta \quad \text{Ecuación 4-5}$$

Donde E es la energía eléctrica procedente de la biomasa, Y es el rendimiento de metano de la biomasa (m³/ton), PCI es el poder calorífico inferior del metano, el cual se asume como 10 kWh/m³, y η es la eficiencia de conversión, de acuerdo con la literatura se toma 37% [92].

4.2.6 Parámetros de control

Los parámetros de control se realizan sobre los tres reactores al inicio y al final de cada ensayo de PMB (ver Tabla 4-2). Son necesarios para calcular y evaluar la biodegradación de la materia orgánica a través de la reducción de SV y ST.

Tabla 4-2. Parámetros de control y su periodicidad en cada ensayo

M	Ensayo	ST	SV	FOS/TAC	NTK	pH	Periodicidad
1	FORSU-P-R	X	X	X	X	X	Inicial y final
2	FORSU-P160-R180	X	X	X	X	X	Inicio y final
3	FORSU-P180-R180	X	X	X	X	X	Inicio y final
4	FORSU-P160-R200	X	X	X	X	X	Inicio y final
5	FORSU-P180-R200	X	X	X	X	X	Inicio y final

En los ensayos de CoDA a diferencia de los de monodigestión (MoDA) el sistema de muestreo se hizo sobre los tres reactores de igual mezcla por triplicado.

4.2.7 Análisis estadístico

Los resultados obtenidos de los ensayos de potencial metanogénico se analizaron estadísticamente utilizando el software STATA. Todos los resultados se presentan con la desviación estándar.

- Medias muestrales

La comparación de las medidas muestrales se basó en comparar los resultados sobre producción de metano para determinar la CoDA con mayor rendimiento de metano o si por el contrario se presentó un mejor comportamiento en la MoDA de cierto sustrato. Para tratar las medias muestrales se utilizó el análisis basado en la varianza (ANOVA). Solo se realizó el análisis para las muestras con distribución normal mediante la prueba de Shapiro-Wilk con un nivel de probabilidad del 95 % y con homogeneidad de varianzas, la cual se determinó con la prueba de Levene.

- Cinética de la degradación

La producción de biogás puede simularse mediante un modelo de cinética de primer orden (ver Ecuación 4-6). Este modelo se utiliza generalmente para ensayos de biodegradabilidad o potencial metanogénico *batch* o en lotes como una curva exponencial. Este modelo se ha usado en investigaciones previas de DA obteniendo coeficientes de determinación (R^2) superior a 0.9, en consecuencia este modelo representa más del 90% de los datos [59], [105], [106], [107]. Esta cinética entrega información sobre la degradación del sustrato.

$$G(t) = G_M [1 - \exp(-k_0 * t)] \quad \text{Ecuación 4-6}$$

Donde $G(t)$ es la producción de metano acumulado en un tiempo determinado a condiciones normales ($T=0\text{ }^{\circ}\text{C}$, $P=1\text{ atm}$) ($\text{NL} * k g_V^{-1}$); G_M es la máxima producción de metano acumulado al final del ensayo ($\text{NL} * k g_V^{-1}$); t es el tiempo para una producción acumulada de metano específica (días); y k_0 es la constante de la tasa específica de biodegradabilidad (días^{-1}).

La constante de velocidad específica se calcularon analíticamente a partir de datos experimentales utilizando una regresión de mínimos cuadrados. Se determinó k_0 con un intervalo de confianza del 95 %. La comparación entre k_0 de cada ensayo fue posible debido a que las condiciones del proceso fueron constantes (T , rpm, $SV_{\text{sustrato}}/SV_{\text{inóculo}}$). El valor de k_0 evalúa la influencia de los cosustratos en el proceso anaeróbico. El coeficiente de correlación R^2 se calculó para validar el modelo.

4.3 Resultados y discusión

En este numeral se presentan los resultados del pretratamiento de SE aplicado a los RCB y la CoDA de FORSU y RCB. Todos los resultados se reportan con la desviación estándar.

4.3.1 Composición de los sustratos e inóculo

La FORSU y el inóculo empleado corresponden al mismo material utilizado en el capítulo 3, por tanto, su composición es la misma. Los resultados del análisis próximo, elemental y bioquímico de los sustratos utilizados para la evaluación de la CoDA se presentan en la Tabla 4-3. El contenido de humedad de todos los sustratos es alto, siendo la FORSU la biomasa con menor humedad (~83 %). Los ST bajan en los RCB pretratados (RCB_P) debido a que cuando este material se somete al proceso de SE el vapor saturado se condensa y hace parte del lodo que se recoge del ciclón, y que después es utilizado para alimentar el digestor anaeróbico. El contenido de cenizas en el P_P y R_P es inferior un 67 y 23 % respecto al P y R crudo o sin pretratar (P_C , R_C). En contraste, el pH de los RCB_P es superior al crudo, esto se justifica por la alta humedad con la que ingreso el material al pretratamiento. Los grupos acetilos del material no fueron capaces de bajar el pH en la mezcla para llevarse a cabo la conocida autohidrólisis que sucede durante los procesos de SE. No obstante, como se mencionó

anteriormente el propósito del SE en este estudio fue alterar los compuestos estructurales de la biomasa para hacerlos de mayor acceso al ataque microbiano.

La composición elemental reportada se realizó sobre el lodo, sin embargo, el muestreo fue un desafío al ser una muestra heterogénea, la cantidad de sólidos seleccionado en cada muestreo variaron por encima del 50 %. En consecuencia, los valores de composición elemental se asimilaron a la fracción sólida del pretratamiento. La relación C/N de la biomasa pretratada aumento alrededor del 28 % y 10 % para P y R respectivamente; esto es posible por la solubilización de proteínas. El contenido de azufre disminuyó ligeramente (0.08-0.15 % S) con respecto al material crudo.

El análisis bioquímico determinó un mayor contenido de glucanos (este grupo encierra la glucosa proveniente de almidón y celulosa), pese a que no se determinó el almidón varios estudios reportan un alto contenido en el P (casi el 50 % del total de glucanos), si se tomara de esta forma el almidón en la muestra de P_C sería aproximadamente 20 %, dato similar al informado por Guerrero *et al.* [110]. La hemicelulosa también fue superior en los RCB_P con respecto a los RCB_C. La hemicelulosa (9.37 – 11.77 %) es relativamente baja con respecto a otras biomosas herbáceas, por ende, también lo son los grupos acetilo. Como resultado del bajo contenido de grupos acetilo el efecto de auto hidrólisis causado por un pretratamiento hidrotérmico es más suave que en biomosas con mayor contenido de hemicelulosa.

La lignina fue más baja en P180 (12.44 %) con respecto a P160 (14.58 %), y más alta en R200 (15.40 %) con respecto a R180 (15.34 %). El contenido de grasas y aceites en RCB_P y RCB_C fue inferior al 2%. Teniendo en cuenta la información de la Tabla 4-3 los RCB_P no serían aptos para MoDA debido a su elevada relación de C/N, cerca del doble del valor recomendado (20-30). En el caso del P (~60) la relación C/N fue superior que la de R_P (~49).

La FORSU se sigue considerando el sustrato con mayor degradabilidad por su composición química discutida en el Capítulo 3, bajo contenido de lignina, alto porcentaje de glucanos, hemicelulosa, proteínas, aceites y grasas.

Tabla 4-3. Composición de los sustratos e inóculo de los ensayos de codigestión anaeróbica

Medida (%)	P	R	FORSU	P160	P180	R180	R200	Inóculo
Próximo								
H	93,82±0.34	93,05±0.34	83,42±0.50	97,08±0.18	98,40±0.02	97,47±0.03	97,84±0.04	98.35±0.05
ST	6,18±0.34	6,95±0.34	16,58±0.50	2,92±0.18	1,60±0.02	2,53±0.03	2,16±0.03	1,65±0.05
SV	67.76±0.66	83.12±0.84	91.86±0.12	78.55±7.99	78.68±1.98	73.67±1.70	73.61±4.41	63.62±0.43
SV ^a	4,19±0.27	5,78±0.34	15,23±0.47	2,30±0.35	1,25±0.03	1,87±0.05	1,59±0.11	1,05±0.03
Ce	32.24±0.66	16.88±0.84	8,14±0.12	10,41±3.71	10,21±1.21	12,98±0.73	12,77±1.99	36.38±0.43
pH	6.66±0.05	6.03±0.08	5.20±0.05	7.20±0.01	7.43±0.02	6.28±0.00	6.17±0.00	7.85±0.05
Último								
C	35,50	33,20	45,70	37,60	37,90	37,20	39,00	31,23
N	0,74	0,74	2,81	0,61	0,57	0,76	0,79	4,53
H	5,10	4,70	6,70	5,50	5,50	5,30	5,50	5,10
S	0,08	0,15	0,31	0,07	0,06	0,14	0,13	1,27
C/N	47.97	44.86	16.26	61.64	66.49	48.95	49.37	6.89
Bioquímico								
Lignina	8.60±0.02	10.9±0.49	3.17±0.76	14.58±0.87	12.44±1.58	15.34±1.23	15.40±0.85	NA
Glucanos	43.55±0.20	26.91±0.91	40.50±0.47	51.37±0.54	53.97±1.06	44.62±1.04	51.56±0.488	NA
Hemicelulosa	9.37±0.04	11.77±0.22	4.51±0.057	15.20±0.22	13.96±0.14	18.12±0.21	15.26±0.20	NA
Proteínas	1.62±0.00	1.78±0.03	15.87±3.00	1.65±0.03	1.68±0.01	1.78±0.03	1.84±0.03	NA
Grasas y aceites	1.47±0.11	1.94±0.00	10.28±1.31	0.79±0.01	1.82±0.89	0.93±0.42	1.13±0.22	NA

^aExpresado en base húmeda, NA not analyzed.

4.3.2 Efecto de la explosión de vapor sobre RCB

Los resultados experimentales de la composición química de la fracción sólida (Fs) o sólidos insolubles en agua (SIA) y la fracción líquida (Fl) del P y R se presentan en la Tabla 4-4. Los factores de severidad utilizados son similares a los de otros estudios, este factor puede combinar el efecto de la temperatura y el tiempo como en este caso, o combinar el efecto de la temperatura, el tiempo y el pH.

- Pseudotallo pretratado

La recuperación de sólidos (RS) aumento con el aumento del factor de severidad, se obtuvo RS entre el 64-82 %, estas pérdidas están relacionadas con el material que queda en el reactor, en el ciclón, compuestos volátiles, y la gran cantidad de cenizas solubles (ver Tabla 4-3), otros autores han registrado RS de incluso el 57 % cuando las condiciones son más drásticas, por ejemplo 200 °C durante 40 min. La recuperación de glucanos en P pretratado a 160 °C (P160) y P pretratado a 180 °C (P180) en sólidos insolubles en agua (SIA) fue de 81.2 y 97.9 % respectivamente. Cerca del 100 % de glucanos se recuperaron en la fracción sólida (Fs) de P180. La hemicelulosa de la muestra se recuperó en gran medida como reportan los datos de xilosa (8.78 %) y arabinosa (5.15 %); en otras palabras, la solubilización de la hemicelulosa estuvo entre 22.3-14.08 %, debido principalmente al bajo contenido de grupos acetilo y la humedad de entrada del material. El porcentaje de lignina en el material pretratado fue inferior al crudo (6.98-7.18 %), por lo tanto, se evidencia una solubilización parcial de la lignina (16.5-18.85 %).

La fracción líquida (Fl) del SE está compuesta principalmente por azúcares solubles y compuestos de degradación. Esta fracción líquida es pobre en azúcares, por lo tanto, se considera solo incluir una pequeña parte al proceso de CoDA. Cuando la fracción de azúcares en la Fl es alta es conveniente realizar análisis sobre los compuestos de degradación (2 furfural, 5-HMF y fenoles totales) para conocer posibles inhibiciones en el proceso de DA. Kamdem quien ha estudiado la DA de los RCB_P indica que estos productos son inhibidores en el proceso de fermentación alcohólica pero no en la DA dado que las bacterias metanogénicas son capaces de sintetizarlos [26].

- Raquis pretratado

La RS observada para el R_P varió entre 78.93-82.1 %, aumentando con el de factor de severidad (FS) como en el caso del P_P. La recuperación de glucanos en la Fs fue 75.8 % para raquis pretratado a 180 °C (R180) y 93.08 % para raquis pretratado a 200 °C(R200). En este caso cerca del 100 % de

glucanos se recuperaron en el R200. La fracción de hemicelulosa solubilizada fue 29.65 y 37.04 %. Esto se evidencia por el bajo contenido de grupos acetilo y alta humedad del material. El enriquecimiento de glucanos en el R_P se debe principalmente a la solubilización de extractivos y cenizas solubles. El contenido de lignina en R_P fue inferior en los dos ensayos con respecto al R_C, se observó una solubilización de 35.68 % en R180 y 31.37 % en R200.

La fracción líquida presenta bajos contenidos de glucanos (~4 %) y hemicelulosa (~1 %). Comparado a la FI del P es 50 % inferior; esto es posible por la composición del P, sobre el cual se ha reportado alta cantidad de almidón.

Tabla 4-4. Composición química de la SIA y la fracción líquida del pretratamiento de explosión con vapor.

Medida (%)	P	R	P160	P180	R180	R200
FS (log R ₀)			2.77	3.36	3.36	3.94
RS			63.6	81.8	78.93	82.1
RSIA			47.9	57.7	45.7	48.6
Pérdidas			36.4	18.2	21.07	17.9
Bioquímico SIA						
Lignina ^b	8.60±0.02	10.9±0.49	14.58±0.87 (6.98)	12.44±1.58 (7.18)	15.34±1.23 (7.01)	15.40±0.85 (7.48)
Glucanos ^b	43.55±2.69	26.91±0.91	51.37±0.54 (24.60)	53.97±1.06 (31.14)	44.62±1.04 (20.39)	51.56±0.488 (25.05)
Hemicelulosa ^b	9.37±0.04	11.77±0.22	15.20±0.22 (7.28)	13.96±0.14 (8.05)	18.12±0.21 (8.28)	15.26±0.20 (7.41)
Proteínas	1.62±0.00	1.62±0.00	1.65±0.03	1.68±0.01	1.78±0.03	1.84±0.03
Grasas y aceites	1.47±0.11	1.47±0.11	0.79±0.01	1.82±0.89	0.93±0.42	1.13±0.22
Extractivos	23.51±0.35	27.39±2.56	NA	NA	NA	NA
Acetilos	1.52±0.07	1.68±0.05	2.08±0.09	1.94±0.15	2.55±0.13	2.78±0.18
Bioquímico fracción líquida						
Glucanos			6.67	10.04	3.99	3.88
Hemicelulosa			0.57	0.65	0.85	1.14

SIA: sólidos insolubles en agua, SSA: sólidos solubles en agua, ^blos valores en paréntesis están expresados en g/100g de material crudo seco.

4.3.3 Evaluación de codigestion de FORSU y RCB

En esta sección se presentan los resultados de las codigestiones utilizando RCB crudo y pretratado. El análisis sobre la cinética de degradación permitió observar la CoDA con mayor rendimiento de metano y evaluar los efectos sinérgicos o antagónicos del proceso.

- Ensayos de codigestión

Durante los ensayos de CoDA el 90 % de la producción de metano se produjo dentro de los primeros 14 días, solo para el caso de la mezcla FORSU-P-R y FORSU-P160-R180 se dio en 20 y 18 días respectivamente. La producción acumulada de biogás de las codigestiones de FORSU con residuos de cosecha de banano pretratados (RCB_p) se presentan en la Figura 4-2. Las gráficas incluyen la influencia del inóculo, el cual se sustrae para tratar los datos de rendimientos y cinética.

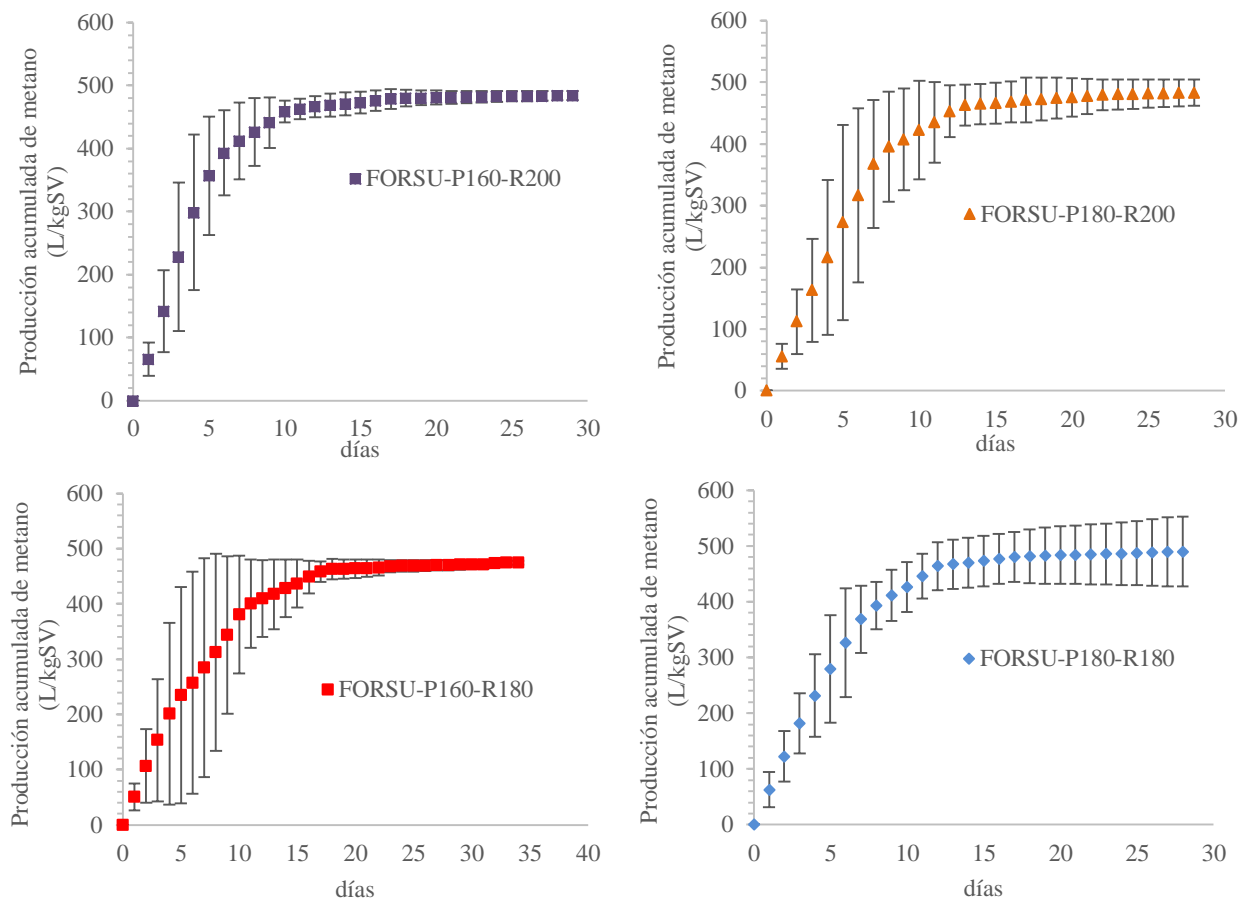


Figura 4-2. Producción acumulada de metano (NL/kg VS) durante 29-35 días a 37 °C en ensayos de codigestión anaeróbica con FORSU y RCB pretratados. nota: influencia del inóculo no sustraída.

Los resultados de los parámetros de control al inicio y al final de los ensayos de degradabilidad se observan en la Tabla 4-5 y Tabla 4-6 respectivamente. En todos los casos se evidenció una disminución en el porcentaje de SV y ST. El valor de FOS/TAC se mantuvo entre 0.2-0.3 que de acuerdo al método representa una baja carga orgánica. Esto es común en los ensayos *batch* para la determinación del potencial metanogénico, durante estos ensayos se pretende dar las mejores condiciones de proceso con el fin de obtener la máxima producción de biogás y metano. El pH fue menor al final del ensayo, pero se mantuvo en el rango apropiado para el proceso de DA. La variación del NTK fue máxima en la mezcla FORSU-P160-R180 (23%), en las demás mezclas se presentó inferior al 10%.

Tabla 4-5. Parámetros de control sobre cada ensayo al inicio de la codigestión

M	Ensayo	ST (%)	SV (%)	FOS/TAC	pH	NTK (%)
1	FORSU-P160-R180	2.25±0.22	1.46±0.12	0.268	7.91±0.10	0.34±0.00
2	FORSU-P180-R180	2.26±0.07	1.52±0.00	0.279	7.16±0.04	0.26±0.00
3	FORSU-P160-R200	2.31±0.04	1.51±0.30	0.348	6.98±0.18	0.24±0.00
4	FORSU-P180-R200	2.22±0.06	1.45±0.03	0.257	7.02±0.28	0.27±0.00
5	FORSU-P-R	2.48±1.45	1.55±5.24	0.215	6.98±0.05	0.28±0.01

Nota: medidas ± error estándar

Tabla 4-6. Parámetros de control sobre cada ensayo al final de la codigestión

M	Ensayo	ST (%)	SV (%)	FOS/TAC	pH	NTK (%)
1	FORSU-P160-R180	2.04±1.25	1.34±0.46	0.299	7.32±0.48	0.26±0.01
2	FORSU-P180-R180	1.73±2.58	1.09±0.02	0.265	6.89±0.02	0.23±0.00
3	FORSU-P160-R200	2.04±0.85	1.33±0.95	0.297	6.62±0.05	0.22±0.03
4	FORSU-P180-R200	1.90±0.05	1.22±5.34	0.215	6.74±0.59	0.24±0.02
5	FORSU-P-R	2.31±1.35	1.47±0.87	0.235	6.69±0.99	0.26±0.01

Nota: medidas ± error estándar

La reducción en sólidos volátiles se puede relacionar con la degradación de la materia orgánica. En la Tabla 4-7 se presentan los datos de rendimiento de metano teórico calculados con la ecuación de Buswell-Mueller [104] de las biomásas pretratadas individualmente. De acuerdo a la caracterización elemental a medida que aumenta la severidad del pretratamiento aumenta el rendimiento de metano. Se obtuvo teóricamente un rendimiento de 469.38, 475.47, 451.34, y 496.68 L_{CH₄}/kg SV de la MoDA de P160, P180, R180 y R200 respectivamente (ver Tabla 4-7). Con base en los datos experimentales se observó el mayor rendimiento de metano en la CoDA FORSU-P180-R180 (ver Figura 4-3)

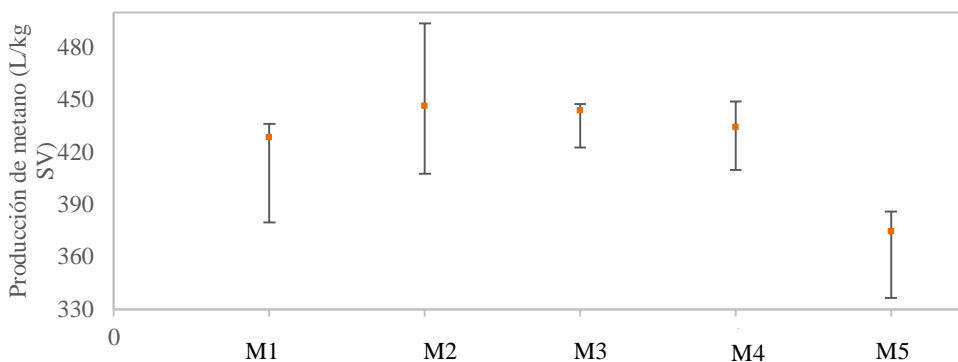


Figura 4-3. Producción de metano de las mezclas de codigestión. M1 (FORSU-P160-R180), M2 (FORSU-P180-R180), M3 (FORSU-P160-R200), M4 (FORSU-P180-R200) y M5 (FORSU-P-R). El punto y cada extremo corresponden a los valores obtenidos en cada reactor réplica.

Con el propósito de comparar los resultados obtenidos en los ensayos de MoDA y CoDA, los valores experimentales de las monodigestiones de FORSU, P y R se ajustaron considerando los gSV alimentados en los ensayos de CoDA (ver Tabla 4-7). Para los ensayos de MoDA se alimentaron 1.75 g SV y en los ensayos de CoDA con material pretratado fueron 1.55 g SV.

Durante las codigestiones de FORSU, P y R se observó la mayor reducción de SV en la mezcla FORSU-P180-R180, bajo esta misma mezcla se registró el mayor rendimiento de metano 457.47 L_{CH_4}/kg SV, seguido de la mezcla FORSU-P160-R200 con 446.05 L_{CH_4}/kg SV, FORSU-P160-R200 438.95 L_{CH_4}/kg SV y FORSU-P160-R180 422.33 L_{CH_4}/kg SV. La CoDA con el material pretratado a menor factor de severidad tuvo el menor rendimiento de metano. La CoDA de FORSU con RCB_C presento un rendimiento de 365.58 L_{CH_4}/kg SV, es decir que después del pretratamiento el rendimiento incrementó 15-25%. Los rendimientos de la mezcla 1, 2, 3, y 4 equivalen a 159.42, 201.85, 177.29, y 183.47 kWh/t fresca respectivamente, 8 a 37% superior a lo que se puede obtener con el material sin pretratar.

Estadísticamente se obtuvo p 0.56 para los ensayos M1, M2, M3, M4, y M5, es decir, el pretratamiento fue efectivo, y presento una diferencia significativa entre las medias de los ensayos pretratados y el crudo. Además, se evaluó solo los ensayos con material pretratado (M2, M3, M4 y M5), en este caso el p fue 0.0007, es decir, no hubo diferencia significativa entre las codigestiones con P y R pretratados (ver Anexo A). Por lo tanto, los parámetros utilizados en el pretratamiento de

SE (temperatura y tiempo) no reflejaron una diferencia significativa entre las codigestiones con P_P y R_P.

Tabla 4-7. Rendimiento de metano teórico y experimental de los RCB_P y las mezclas con su respectiva reducción de SV durante los ensayos de codigestión

Ensayo	C/N	Teórico (L _{CH4} /kgSV)	Experimental (L _{CH4} /kgSV)	Reducción %SV	EE (kWh/t _{bh} ^a)
FORSU	16.26	NA	534.53±0.36	NA	301.20
P	47.97	NA	363.29±4.81	NA	56.32
R	44.86	NA	202.19±5.09	NA	43.26
P160	61.63	469.38	NA	NA	NA
P180	66.49	475.47	NA	NA	NA
R180	48.94	451.34	NA	NA	NA
R200	49.36	496.68	NA	NA	NA
FORSU-P160-R180	20.11	616.87	422.33±25.41	25.60±13.57	159.42
FORSU-P180-R180	20.23	618.58	457.47±35.87	45.21±3.53	201.85
FORSU-P160-R200	20.11	617.73	446.05±11.31	39.65±2.19	177.29
FORSU-P180-R200	20.25	619.44	438.95±16.37	41.28±5.94	183.47
FORSU-P-R	20.97	569.80	365.58±20.84	20.18±2.65	147.41

NA: no analizado

Pan *et al.* evaluaron como pretratamiento el prensado del P húmedo para incrementar el rendimiento de biogás, obteniendo un incremento del 41 % (149.0 L_{CH4}/kg SV a 204.2 L_{CH4}/kg SV). La energía consumida para pretratar 1 t de P húmedo fue 2.6 kWh [92]. Hjorth *et al.* evaluaron la extrusión como pretratamiento de la paja de cebada consiguiendo un aumento del 70 % en el rendimiento de biogás (170 L_{CH4}/kg SV a 280 L_{CH4}/kg SV). La energía consumida por la extrusora fue 4-10 kWh/t P_{bh} [133]. En ambos estudios el efecto del pretratamiento en el rendimiento de biogás y metano fue superior al obtenido en este estudio (25 % después del SE), no obstante, el rendimiento de metano del P crudo (sin pretratamiento) utilizado en este estudio fue 363.29 L_{CH4}/kg SV. Este valor fue superior al conseguido en los estudios citados incluso después de los pretratamientos evaluados (prensado y extrusión).

Guerrero evaluó el pretratamiento del P mediante SE para la producción de bioetanol identificando que cerca del 12 % de la energía se utiliza en esta operación y el 32 % en el tratamiento de agua cuando el SE se funciona con un tratamiento ácido para intensificar el efecto de la hidrólisis [134].

La energía utilizada por el SE fue 1.68 kWh para tratar 1 t de P y R secos (90 % ST). Para este estudio el consumo de energía es mayor (cerca de 15 kWh) debido a que los residuos de cosecha de banano o plátano se evaluaron húmedos (10 % ST). Por lo anterior, es conveniente realizar un prensado previo al SE para solo tratar el material sólido y después incorporar el líquido orgánico al proceso de DA. También evaluar en continuo el SE con recuperación de calor para disminuir el consumo de energía, dado que el rendimiento de biogás y metano es mayor cuando los RCB están húmedos que cuando están secos.

- Evaluación de efectos sinérgicos

El efecto sinérgico se evidencia cuando al mezclar varios sustratos el rendimiento de metano de la CoDA es superior a la suma proporcional del rendimiento de metano de cada sustrato en MoDA. Cuando sucede lo contrario, que el rendimiento de la CoDA es menor, el efecto producido es antagónico. Para este análisis se tomó los rendimientos experimentales de metano en MoDA de FORSU, P y R para calcular los rendimientos teóricos de cada mezcla de acuerdo al porcentaje de SV de cada sustrato en la CoDA (ver Tabla 4-8). Por lo tanto, los valores de la mezcla M2-M5 fueron los mismos ya que la composición en SV alimentados fue igual. Esto se considera una aproximación debido a que el rendimiento de RCB_P son mayores a los RCB_C .

En todas las codigestiones se observan efectos antagónicos (inferior a 1), es decir, la mezcla tuvo un efecto competitivo en la producción final. El rendimiento de la MoDA de FORSU fue superior a los rendimientos obtenidos por cada mezcla. Se destaca que la mezcla 3 (FORSU-P180-R180) el valor obtenido fue 13% inferior frente al valor teórico por lo que se considera pertinente la evaluación de parámetros como SV, relación C/N, ST o ajustar condiciones del pretratamiento con el propósito de conseguir un efecto sinérgico, mayor a 1.

- Cinética de degradación

En la Tabla 4-9 se presentan los resultados del estudio de la tasa específica de degradación (k_0) descrita en la sección 4.2.7. El uso de la FORSU mejoró la cinética del proceso de DA respecto a la de P y R como monosustrato evaluados en el capítulo 3, la cual fue 0.157 para ambos. La adición de FORSU en la CoDA de P y R crudos aumentó la tasa de degradabilidad en 1.2 %. Después de pretratar P y R se consiguió un aumento del 5.09, 31.85, 21.66 y 22.29 % para las mezclas M1, M2, M3, M4 y M5 correspondientemente. Sin embargo, la tasa de degradación de la FORSU en MoDA sigue siendo superior frente a las codigestiones evaluadas en este estudio (0.262). Por tanto, el uso

de FORSU es conveniente para el mejoramiento de la digestión de P y R pero sin conseguir un efecto sinérgico evaluado anteriormente.

Debido a que esta CoDA no había sido estudiada, los resultados de las codigestiones no se compararon con otros estudios.

Tabla 4-8. Sinergias y antagonismos producidos en la codigestión de FORSU, P y R.

Sustrato	Rendimiento ($L_{CH_4}/kgSV$)	Composición SV (%)				
		M1	M2	M3	M4	M5
FORSU	534.53	70	70	70	70	60
P	363.29					37.46
R	202.19					2.54
P160	469.38	28.095		28.095		
P180	475.47		28.095		28.095	
R180	451.34	1.905	1.905			
R200	496.68			1.905	1.905	
Rendimiento teórico		481.29	481.29	481.29	481.29	463.46
($L_{CH_4}/kg SV$)						
Rendimiento obtenido		422.33	457.47	446.05	438.95	365.58
($L_{CH_4}/kg SV$)						
Efecto sinérgico		0.86	0.93	0.91	0.89	0.78

Tabla 4-9. Parámetros de la cinética de degradación de las codigestiones de FORSU, P, y R

M	Ensayo	k_0 (días ⁻¹)	R^2	R^2 ajustada
1	OFMSW-P160-R180	0.176±0.05	0.976±0.01	0.943±0.01
2	OFMSW-P180-R180	0.207±0.03	0.973±0.04	0.937±0.02
3	OFMSW-P160-R200	0.186±0.05	0.976±0.01	0.939±0.01
4	OFMSW-P180-R200	0.198±0.03	0.967±0.01	0.942±0.01
5	OFMSW-P-R	0.159±0.05	0.986±0.09	0.975±0.08

4.4 Conclusiones

De acuerdo al estudio de la codigestión de FORSU, P y R se concluye lo siguiente:

Los residuos de cosecha de banano pueden utilizarse como sustrato para la producción de biogás y metano. Este material además se puede someter a un pretratamiento con explosión con vapor para aumentar el rendimiento de biogás y metano gracias a la solubilización de la lignina y la alteración en la estructura de la biomasa que facilita el ataque microbiano. La máxima solubilización de lignina fue 23 % para P y 55 % para R con una recuperación de glucanos del 71 y 93 % respectivamente.

El SE es un proceso utilizado comercialmente, sin embargo, bajo las condiciones de los residuos de cosecha de banano estudiados no es conveniente por su alta humedad ocasionando que el efecto de autohidrólisis por el que se caracteriza el SE sea mínimo y el consumo energético sea alto. Sin embargo, se recomienda que el material se encuentre húmedo porque favorece el proceso de DA expresándose con un rendimiento de biogás y metano mayor a cuando los RCB se encuentra seco.

La codigestión FORSU-P-R donde el P y R fueron pretratados a 180 °C durante 10 minutos registró el mayor rendimiento de metano. Se obtuvo 457.47 L_{CH₄}/kg SV equivalentes 201.85 kWh_e/t_{bb}, 25 % superior a la codigestión con RCB crudos. No obstante, no se reflejó un efecto sinérgico en la mezcla, por lo tanto, es necesaria una modificación en las condiciones del pretratamiento y la relación sólidos volátiles de cada sustrato en la mezcla. Cabe mencionar que la energía obtenida es suficiente para mantener 1 bombillo de 100 vatios encendido durante 84 días.

5 Análisis técnico económico de una planta de biogás rural: caso de estudio

5.1 Introducción

El acceso a la energía eléctrica y al gas natural (GN) aún no está garantizada en todo el territorio colombiano. Existen 1.916 localidades¹ sin acceso a energía eléctrica [135]. Estos lugares son denominados zonas no interconectadas (ZNI) y representan cerca del 52 % del territorio colombiano con alrededor de 1.9 M de habitantes, con un nivel de necesidades básicas insatisfechas superior al 77 % [136]. Por su parte, la cobertura de GN es del 80 % (con un 98 % de este valor que corresponde a usuarios residenciales). Se estima que las reservas actuales alcancen hasta el 2023 [124][137]. En el 2017, 56.8 % de los hogares colombianos cocinaron con GN y 23 % con gas licuado de petróleo (GLP) [138].

Actualmente, existen 2.800 millones de personas en el mundo y 1.664.000 hogares colombianos que cocinan con leña en una relación de 10.1 kg/día [31]. Estos hogares están ubicados principalmente en zonas rurales, poblaciones marginadas y ZNI. El consumo nacional total de leña fue 6.123 kilotoneladas en el año 2018 [31], [32]. La leña es responsable en promedio del 2.1 % del total de las emisiones de GEI a nivel mundial [139]. Además, se le asocia una tasa de mortalidad nacional por contaminación del aire interior (por uso de combustibles sólidos para cocinar) de 32/100.000 habitantes principalmente en mujeres (> 44 años) y costos de atención médica equivalentes a 0.38 % del PIB en 2015 [140].

La implementación de la tecnología del biogás y biometano para la generación distribuida de energía principalmente en zonas rurales, poblaciones marginadas y ZNI tiene un gran impacto, dado que se pueden utilizar residuos agrícolas como sustratos para la digestión. La DA es un proceso promisorio para ser aplicado en estas zonas.

En Colombia el área destinada para cultivos es de 7.1 millones de hectáreas equivalentes al 17% del territorio reservado para el sector agropecuario. El banano es uno de los principales cultivos con alrededor de 415 mil ha, cerca del 11 % del área sembrada en Colombia [141], este cultivo presenta diversas ventajas como ser un cultivo permanente (se pueden sembrar todo el año) y crecen en regiones tropicales con intervalos de temperatura entre 20-30 °C. Durante este trabajo se estudió la degradación anaeróbica de los residuos de cosecha de banano como el pseudotallo (P) y raquis (R)

¹ División territorial genérica para cualquier núcleo de población con identidad propia que puede ser de tamaño pequeño con pocos habitantes o de gran tamaño como una ciudad [135].

crudos y pretratados con explosión con vapor, y de la FORSU tanto en monodigestión anaerobia (MoDA) como en codigestión (CoDA). Se obtuvo un efecto antagónico en la CoDA con un incremento máximo en el rendimiento de metano después del pretratamiento del 25 %. En consecuencia, no se realiza el análisis técnico económico sobre este pretratamiento por no considerarse viable en ZNI pero si de interés para plantas comerciales que procesen altas cantidades de RCB de modo que pueda operarse el SE en continuo y con recuperación de vapor con el fin de que la energía obtenida del material pretratado sea mayor a la requerida en el pretratamiento. En los ensayos de MoDA se obtuvo 15.22 y 11.48 m³CH₄/t de material húmedo para P y R respectivamente, siendo esta cantidad suficiente para satisfacer las necesidades básicas energéticas de una familia campesina.

Por lo anterior, el objetivo principal de este capítulo fue realizar un análisis técnico económico de una planta de biogás y metano para una familia que vive en el área rural utilizando como sustrato el P y como alternativa al uso de leña. Se seleccionó el P debido a que se genera en mayor cantidad y tiene un PBM superior al del R.

5.2 Metodología

Para llevar a cabo el análisis técnico económico de una planta de biogás es necesario delimitar el caso de estudio para definir el requerimiento energético y la cantidad de sustrato para cumplir con la demanda energética. En esta sección se define el contexto de aplicación, la evaluación técnica y económica mediante indicadores financieros como la TIR y VPN.

5.2.1 Contexto de aplicación

El primer paso consiste en definir el caso de estudio, los sustratos e inóculo para el proceso, el acondicionamiento de estas materias primas, las condiciones del proceso de DA, el tipo de reactor y el uso energético del biogás. En este numeral se detalla y justifica cada elección para el análisis.

- Caso de estudio

El análisis se realiza para un hogar campesino que vive en sitios con temperatura máxima y mínima de 30 y 22 °C. Un ejemplo es la población de la vereda la Hermosa en el municipio de Paz de Ariporo en el departamento de Casanare. La Hermosa hace parte de las 1.916 localidades que no cuentan con servicio de energía eléctrica en el país, y además no tienen servicio de GN. Alrededor de 46 hogares cocinan con leña. Cada hogar está conformado en promedio por 3.2 personas. Teniendo en cuenta

este caso base, los requerimientos energéticos de un hogar son 1 m³_{biogás}/día y 2.82 kWh/día (ver Tabla 5-1).

Tabla 5-1. Requerimientos básicos de biogás para un hogar campesino.

Requerimiento	Potencia (kWh)	Tiempo de uso diario (horas)	Consumo (m ³ _{biogás} /día)	Consumo (kWh/día)	Uso
Cocción (5 horas)		6	1		Combustible
Iluminación (3 lámparas)	0.015	4		0.18	Electricidad
Refrigeración (nevera, todo el día)	0.18	10		1.80	Electricidad
Aireación (1 ventilador)	0.1	4		0.16	Electricidad
Entretenimiento (1 televisor)	0.075	2		0.15	Electricidad
Comunicación (1 cargador con celular conectado)	0.012	4		0.05	Electricidad
Educación (1 portátil)	0.12	4		0.48	Electricidad
Total			1	2.82	

Fuente: adaptado de [55] [142]

Para este caso la composición promedio del biogás de la MoDA de P crudo se determinó experimentalmente con el medidor Biogás 5000 tal como se describió en el Capítulo 3, numeral 3.3.4 en la Tabla 3-7.

- Sustrato e inóculo

La selección del sustrato se basa en cuatro características: el uso alterno, la disponibilidad, el rendimiento de metano y las características fisicoquímicas. De acuerdo a la información presentada en este estudio el P es un residuo de cosecha de banano (RCB) que actualmente es subutilizados, cerca del 85 % del P se abandonan en el campo o en un sitio aislado. [37]. Durante el 2017 se generaron aproximadamente 23 Mt de P debido a que el banano es un cultivo permanente, por lo que se siembra durante todo el año. Por tanto, el P además de no tener uso está altamente disponible. El potencial metanogénico de P se determinó en el capítulo 2, dando un valor de 15.22 m³_{CH₄}/t de material húmedo. Por último, el P tiene características favorables para el proceso de DA, tales como bajo contenido de azufre (S, ~0.11 %), alta humedad (~90 %) y bajo contenido de lignina (~9.7 %).

En cuanto al inóculo, se recomienda la evaluación con inóculos como estiércol de animal debido a la zona donde se presenta el proyecto, sin embargo, el potencial metanogénico se evaluó utilizando lodos de PTAR, razón por la cual el inóculo utilizado en este análisis es el mismo.

- Acondicionamiento del sustrato

Se asume que el sustrato no presenta microorganismos patógenos ni para la salud humana ni para el proceso de DA, por lo tanto, no se considera ninguna etapa de higienización. El acondicionamiento del sustrato consiste en un pretratamiento físico de reducción de tamaño de partícula en un triturador para material húmedo.

- Parámetros del proceso y tipo de digestor

En la zona rural los digestores más comunes son el modelo indio, chino, salchicha o de bolsa y se operan en semicontinuo o continuo. Los sólidos totales del material a digerir son una característica importante a la hora de seleccionar el tipo de digestor. El P presenta en promedio 6.5 % ST, por lo que se recomienda un reactor de mezcla completa. La DA se realizará a condiciones mesofílicas 37 ± 2 °C.

- Uso energético del biogás

El biogás se puede usar como combustible, para generación de energía eléctrica, térmica o cogeneración. En cada caso el biogás debe cumplir ciertos requisitos y ser purificado hasta el punto que sea permitido su uso. En este caso de estudio, el biogás se va a utilizar para la cocción y la cogeneración. Por lo tanto, es necesario la remoción de H_2S (<1000 ppm), y la remoción del vapor de agua (ver Tabla 2-3). Debido a las bajas concentraciones de S en el sustrato el H_2S en el biogás fue inferior a 200 ppm. La eliminación de vapor de agua de la corriente de gas se realizó mediante enfriamiento para condensar el agua presente en el biogás.

5.2.2 Evaluación técnica

A través de la evaluación técnica se describe el proceso y se define el tamaño, y los equipos para el desarrollo del proyecto.

- Diagrama del proceso

El proceso de DA de P contempla 4 etapas tales como acondicionamiento del sustrato (recolección, transporte y reducción de tamaño de partícula), digestión anaerobia, tratamiento del biogás (remoción de H_2S y enfriamiento) y uso energético del biogás (cocción y cogeneración) (ver Figura

5-1). También una etapa simultánea de tratamiento del digerido en la que se realiza compostaje para uso como abono en el suelo. La energía térmica proveniente de la cogeneración puede utilizarse para el secado del compost.

La recolección del sustrato se realiza en campo, se deben cortar las plantas que se van a utilizar como sustrato, esta actividad es manual. El transporte desde el sitio de siembra hasta el lugar de almacenamiento o recepción se realiza en carretilla, considerando que el lugar de plantación es el mismo que de cogeneración. En lugares con alta densidad de cultivo se puede automatizar o transportar en vehículos de carga, no obstante, en este caso se considerará solo los equipos básicos.

En el tanque de recepción, el material se deposita sin ningún tratamiento. Se recomienda mantener la cantidad necesaria para el funcionamiento de 2 días del digestor.

Posteriormente, en la etapa de corte se reduce el tamaño de partícula del P. El material presenta una humedad de aproximadamente 93 % y es fibroso, por tanto, se recomienda el uso de una cortadora para material orgánico húmedo.

Durante la DA el reactor CSTR se mantiene a 37 °C. Para la limpieza del biogás se hace pasar el gas por un desulfurizador y después por un intercambiador de calor para retirar el H₂S y condensar el vapor de agua. En la fase de cogeneración el biogás tratado se utiliza para la producción de energía eléctrica y térmica, y 1 m³ de metano es destinado para la cocción.

En una etapa simultánea, el digerido se filtra para separar la fase sólida de la líquida. El sólido se utiliza para realizar compostaje. El líquido por su parte puede verterse directamente al suelo siempre y cuando cumpla con las condiciones sanitarias para su utilización como bioabono. El ICA por medio de la resolución No. 068370 de 2020 establece los requisitos para la utilización de bioinsumos para uso agrícola [143]. Para conocer su composición deben realizarse análisis de macro y micronutrientes. En este estudio no se incluyó el análisis del digerido por lo tanto solo se presentan los posibles usos.

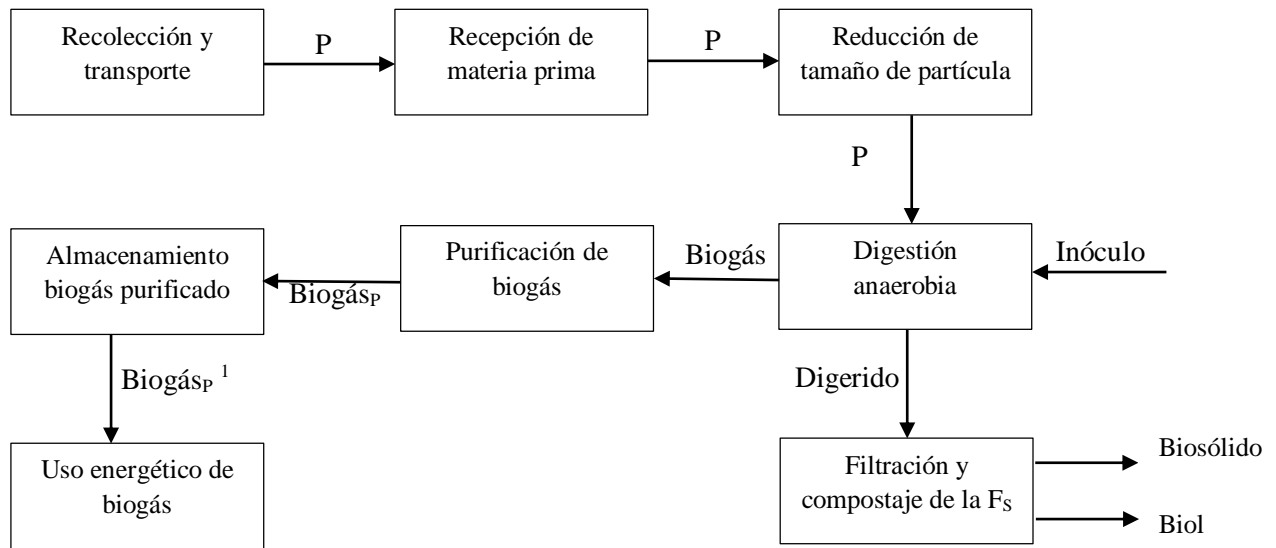


Figura 5-1. Diagrama de bloques del proceso de digestión anaerobia de pseudotallo (P).

Nota: ¹biogás purificado, F_s: Fracción sólida.

- Consideraciones del análisis técnico

Para llevar a cabo los balances de masa y energía se tuvo en cuenta las siguientes consideraciones:

El balance se realizó para la generación diaria de P. De acuerdo a los requerimientos energéticos (ver Tabla 5-1) es necesario contar con 540 kg de sustrato, lo que se consigue con el P de 4 plantas de banano. Por tanto, para que una familia campesina disponga con electricidad durante todo el año es necesario contar con 1460 plantas de banano y un terreno de aproximadamente 0.6 hectáreas para su plantación.

El fluido de enfriamiento en el intercambiador de calor es agua. Esta agua por lo general debe provenir de un cuerpo hídrico. En el caso de la vereda La Hermosa, esta se encuentra ubicada a orillas del río Meta, por lo que puede hacerse uso de esta agua que se devuelve nuevamente al río cuando no se recircule en el intercambiador. Para este caso particular, no se contabilizó este fluido de servicio en el análisis económico.

La combustión del biogás seco y sin H₂S en el cogenerador es completa. Este cogenerador tiene una eficiencia del 87 %, siendo 34 % de energía eléctrica y 53 % de energía térmica.

En la Figura 5-2 se presenta el diagrama de flujo del proceso de digestión anaerobia. La descripción de los equipos y las corrientes se registran en la Tabla 5-2 y la Tabla 5-3.

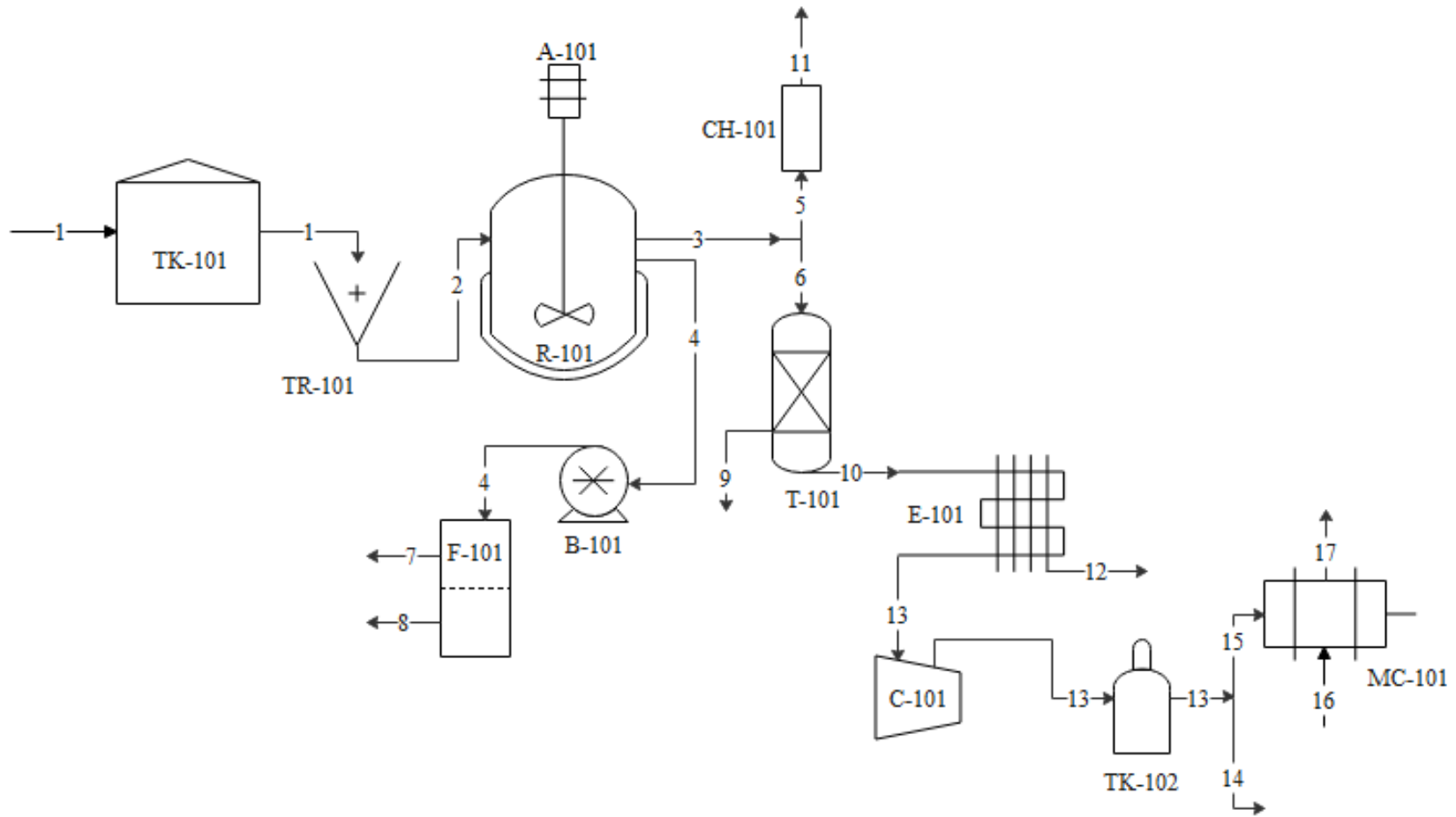


Figura 5-2. Diagrama de flujo del proceso de digestión anaerobia de pseudotallo de banano.

Fuente: Elaborado en software EdrawMax

Tabla 5-2. Descripción de los procesos, etapas y equipos utilizados en la planta rural de biogás

Proceso asociado	Código	Etapas	Código	Equipo	Código	Función
Recepción de materia prima	AP	Alimentación	AP-1	Tanque de almacenamiento atmosférico	TK-101	Almacenar el P proveniente de campo
Reducción de tamaño de partícula	TR	Reducción	TR-1	Triturador	TR-101	Triturar el material lignocelulósico
Digestión anaeróbica	DA	Digestión	DA-1	Digestor anaeróbico	R-101	Llevar a cabo el proceso de digestión anaeróbica del P
		Agitación	DA-2	Agitador	A-101	Mantener el contacto sustrato-inóculo y la temperatura constante en el reactor.
		Descarga	DA-3	Bomba	B-101	Extraer el lodo digerido del digestor
		Quema	DA-4	Chimenea	CH-101	Sistema de seguridad, quemar el biogás cuando no se utilice.
Filtración y compostaje del digerido	FD	Filtración	FD-1	Filtro	F-101	Separar del digerido sólido del líquido para su posterior uso como biol y biosólido
Purificación de biogás o <i>upgrading</i>	PB	Desulfuración	PB-1	Torre desulfuradora	T-101	Eliminar el H ₂ S del biogás
		Condensación	PB-2	Condensador	E-101	Condensar el vapor de agua contenida en el biogás
Almacenamiento del biogás purificado	AB	Compresión	AB-1	Compresor	C-101	Comprimir el biogás purificado, este compresor realiza varios ciclos de compresión y enfriado, el gas sale a 40°C
		Almacenamiento	AB-2	Tanque de almacenamiento a presión	TK-102	Almacenar el biogás purificado y comprimirlo para su posterior uso en cocción y cogeneración
Uso energético de biogás	CHP	Cogeneración	CHP-1	Unidad de Cogeneración	MC-101	Generar energía eléctrica y térmica a partir de biogás purificado.

Las plantas rurales de biogás cuyo propósito es utilizar el biogás para la cocción cuentan con sistemas de purificación de fácil instalación y bajo costo como un contenedor de soda cáustica para atrapar el CO₂ y una trampa con viruta de hierro para eliminar el H₂S del biogás. Principalmente son digestores tubulares de geoplástico, el cual utiliza materiales económicos [144].

Tabla 5-3. Descripción de las corrientes con base en la Figura 5-2.

Número	Descripción de la corriente
1	P traído de la plantación
2	P triturado
3	Biogás
4	Digerido
5	Biogás para quemar en chimenea
6	Biogás para purificar
7	Digerido sólido o biosol
8	Digerido líquido o biol
9	H ₂ S extraído
10	Biogás sin H ₂ S
11	Gases de combustión de la chimenea
12	Agua condensada proveniente del biogás
13	Biogás seco sin H ₂ S
14	Biogás purificado destinado a cocción
15	Biogás purificado destinado a cogeneración
16	Aire para combustión
17	Gases de combustión del cogenerador

- Análisis DOFA

La identificación cualitativa y cuantitativa de las principales Debilidades, Oportunidades, Fortalezas y Amenazas (DOFA) para el proyecto de biogás descrito en el numeral 5.2.1 Contexto de aplicación se presentan en la Figura 5-3. La tecnología del biogás tiene registro de programas nacionales como los descritos en el numeral 2.3.5 Aplicaciones actuales del biogás, con casos de éxito y lecciones aprendidas. Colombia por su ubicación geográfica en el trópico presenta ventajas frente a otros países con estaciones, dada las temperaturas cálidas en la mayor parte del país.

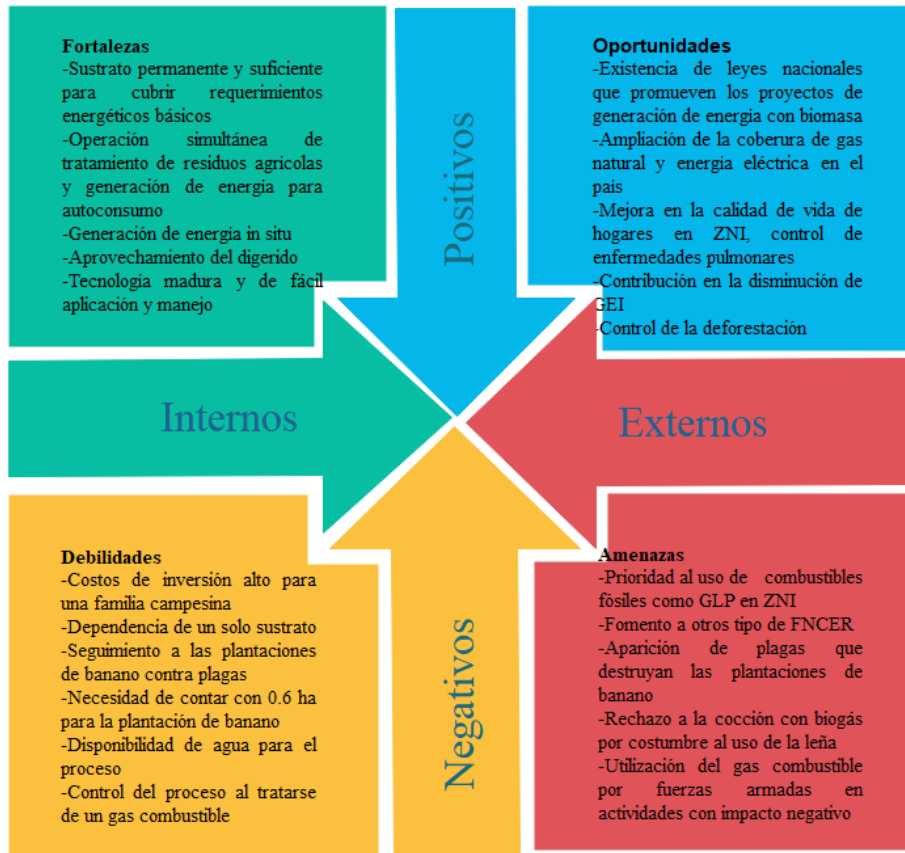


Figura 5-3. Matriz de debilidades, oportunidades, fortalezas, y amenazas (DOFA) de un proyecto de biogás rural a base de pseudotallo.

5.2.3 Evaluación económica

▪ Superestructura

La metodología de superestructura es ampliamente utilizada para la evaluación de proyectos de biomasa [145]. Esta consiste en un análisis de las tecnologías de conversión de la materia prima de estudio, sus productos intermedios y finales. Esta Superestructura incluye tecnologías conocidas como nuevos desarrollos basado en literatura reconocida. La tecnología se estudia desde parámetros técnicos como rendimientos y requerimientos energéticos, así como económicos que incluye costos de producción y operación [146].

En este trabajo se realizó un esquema de superestructura para identificar la materia prima, los productos intermedios, subproductos y los servicios en una planta de producción de biogás a partir

de P. La superestructura no se realizó para otras tecnologías, ni considero pretratamientos debido a que el propósito de este capítulo es evaluar los aspectos técnicos y económicos de una planta de biogás rural para satisfacer las necesidades de un hogar colombiano campesino. Se considera que esta tecnología es la más adecuada para satisfacer simultáneamente los requerimientos de gas para cocción y gas para cogeneración. Además, se tienen en cuenta las características físicas, químicas, y de localización del sustrato, en este caso del P (ver Figura 5-4).

- Estimación de costos

La estimación de costos se basa en el capital de inversión (CAPEX) mediante la identificación de parámetros que deben evaluarse para cada etapa de la superestructura, la variable principal es el costo del equipo en cada etapa (Ver Tabla 5-4). La estimación de costos utilizando el método de porcentaje del costo del equipo entregado se calcula de acuerdo a la ecuación 5-1 y tiene en cuenta el capital fijo, materia prima, costos directos, costos indirectos, y costos de producción. Con lo anterior se calcula el capital de inversión.

$$C_n = \sum(E + f_1E + f_2E \dots + f_nE) \quad \text{Ecuación 5-1}$$

Donde C_n es el costo total del equipo, E es el costo de la adquisición del equipo y f_n es el factor de costo (incluye instalación, tubería, requerimiento de instalación eléctrica, instrumentación y control).

Capital fijo. Está conformado por los activos del proyecto como los equipos y maquinaria, construcciones e instalaciones para poner en marcha la planta de producción de biogás a partir de P. Los costos de los equipos se estimaron en función del costo del equipo por la cantidad de materia prima, y productos procesados.

El terreno y las construcciones equivalen al 20 % del costo del valor del equipo instalado. El cálculo del terreno de construcción y el costo de construcción corresponde al 5 % y 15 % de la maquinaria y equipos respectivamente.

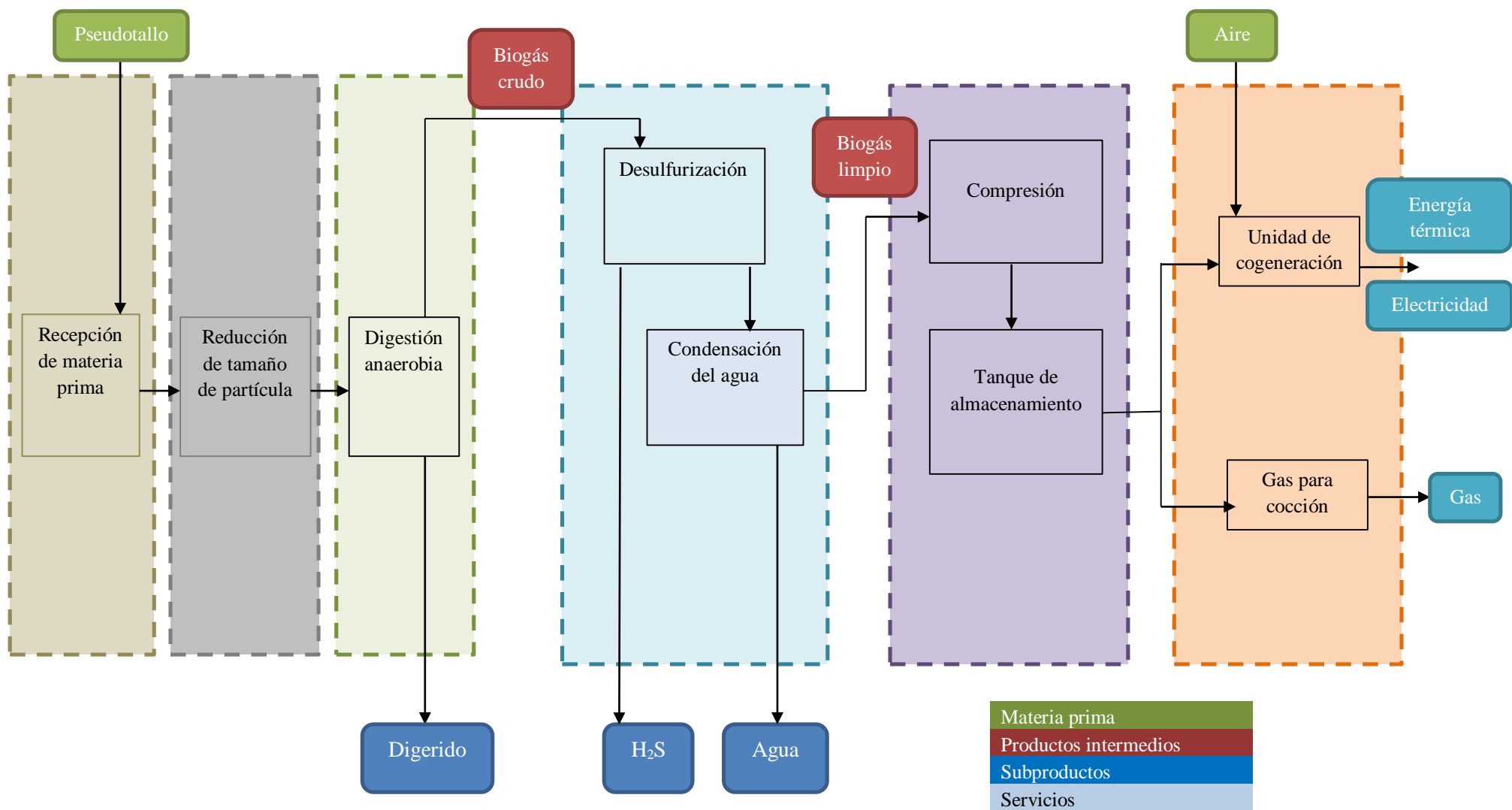


Figura 5-4. Diagrama de la tecnología seleccionada después de realizar la superestructura -producción de biogás a partir de pseudotallo.

Costos directos. Está conformado por los servicios para llevar a cabo la producción. Los servicios incluyen el agua, energía, mantenimiento, y la mano de obra.

El costo del consumo de energía eléctrica de cada equipo (ver Ecuación 5-2) se calculó de acuerdo a la tarifa entregada por la Empresa de Energía del Casanare (Enerca) [147].

$$C_e = Potencia(Kw) * tiempo de operacion(h) * costo de electricidad \left(\frac{COP}{kWh}\right) \quad \text{Ecuación 5-2}$$

Donde C_e es el costo del consumo de energía eléctrica.

Los costos de mano de obra corresponden al trabajo del operador durante la construcción de la planta. Este costo corresponde al salario de 1.479.684 COP (incluye prestaciones sociales) para el año 2020. El número de operadores se determinó de acuerdo a lo expuesto por Peter *et al.* [146]. El costo de mano de obra también incluye una carga de nómina en la que se encuentra el personal administrativo y de servicios generales para la operación que corresponde al 12% del costo de supervisión. El costo de mantenimiento corresponde al 7% del costo de maquinaria y equipamiento.

Costos indirectos. Estos costos no están relacionados directamente con la producción, incluyen la depreciación de la maquinaria, equipos y construcción, impuestos, seguros, sobrecostos, y contingencia (ver Tabla 5-5)

Tabla 5-5. Costos indirectos

Descripción	Factor
Impuestos	0.2 % costo de terreno y construcción
Seguros	2 % costo de terreno y construcción
Depreciación construcción	5 % costo construcción
Depreciación maquinaria y equipos	10 % costo maquinaria y equipos
Sobrecostos	15 % costos indirectos
Contingencia	35% costos fijos

Fuente: Adaptado de [146]

Costos de materia prima. La materia prima del proceso es el P y el inóculo. También se consideran los insumos para el lecho de óxido de hierro de la columna desulfurizadora y el agua utilizada en el condensador. Los únicos que tienen un costo es el inóculo y el lecho de óxido de hierro.

Costos de energía. Estos costos están relacionados con el consumo eléctrico de cada equipo para procesar P, digerido y biogás.

Costos de producción. Este costo se determinó la suma de los costos de conversión, los costos de manufactura y los costos generales (ver Ecuación 5-3).

$$\text{Costos de producción} = CC + CM + CG \quad \text{Ecuación 5-3}$$

Donde CC es el costo de conversión que corresponde a la suma de los costos directos e indirectos; CM es el costo de manufactura que es la suma de los costos de conversión y los costos de materia prima; y CG los costos generales calculados como el 9 % del costo de manufactura

Capital de inversión. Este costo corresponde a la suma de los costos de capital fijo y los costos de producción.

5.2.4 Evaluación financiera

La evaluación económica está ligada al análisis financiero del proyecto. Los indicadores financieros que normalmente se evalúan son el valor presente neto (VPN), tasa interna de retorno (TIR) y el *payback*. Para el caso de estudio no se considera trascendente la evaluación de estos indicadores, ya que la planta se construye porque en el sitio no existe conexión a GN ni electricidad. Estos proyectos que incentivan la distribución distribuida debe estar acompañado de incentivos tributarios. Es claro que la inversión de la planta no puede ser costeada por el beneficiario, por tanto, debe hacer parte de los Plan Indicativo de Expansión de Energía Eléctrica (PIEC) y cobertura de gas natural en el país. Para lograr un precio competitivo tanto de gas domiciliario como del kWh se debe externalizar diversos aspectos ambientales, sociales y de salud.

5.3 Resultados y discusión

En este numeral se presenta los valores obtenidos del balance de masa y energía cuyos cálculos se detallan en el Anexo C y Anexo D respectivamente. Esta información se utiliza para realizar el análisis técnico, económico y financiero de la planta de biogás rural.

La planta propuesta toma en consideración aspectos que no han sido evaluados en otros análisis técnico económicos para la producción de gas domiciliario y/o energía eléctrica y/o energía térmica para un hogar colombiano ubicado en zona rural o zona no interconectada (ZNI).

El primer aspecto es abarcar la necesidad de gas domiciliario, energía eléctrica y energía térmica simultáneamente. Segundo, incluir dentro de sus requerimientos (además de la cocción, la iluminación y la aireación) la educación, comunicación, entretenimiento, y aireación, al considerarse importantes para el mejoramiento de la calidad de vida de los campesinos. Tercero, se plantea una planta que consta de un reactor con agitación, diferente a los modelos propuestos para zonas rurales como el modelo indio, chino o salchicha, plantas tecnológicamente simples, y que no se ha registrado innovación en el diseño durante los últimos años; se propone el almacenamiento del gas en cilindros de modo que el biogás incluso en los días que no se utilice se pueda recolectar, además puede ser interesante el uso de baterías de modo que el cogenerador no se encienda todos los días, solo cuando se descarguen. Por último, se realiza la evaluación técnico económica utilizando un residuo vegetal abundante y permanente, sobre el cual existe poca información en su uso como sustrato para la producción de biogás a través del proceso de DA. Sin embargo, los resultados a nivel laboratorio son promisorios para proyectos como el evaluado en este capítulo.

5.3.1 Balance de masa

Los valores del balance de masa corresponden a la generación diaria de P y tiene en cuenta todas las consideraciones descritas en el numeral 5.2.2 *Análisis técnico*. Los detalles sobre los cálculos del balance de masa y energía se presentan en el Anexo C y D respectivamente. La Tabla 5-6, Tabla 5-7 y la Tabla 5-8 presentan la información obtenida de los balances de masa por corriente, en cada equipo y el balance global del proceso.

La cantidad de biogás producido por los 540 kg de P es de 7.095 kg. Esta corriente se purifica en una torre desulfurizadora donde se retira 0.001 kg de H_2S , en seguida se pasa la nueva corriente de biogás por el condensador para eliminar 0.291 kg de H_2O del biogás. Con estos dos tratamientos se obtiene una mezcla de gases libre de agua y con solo 10 ppm de H_2S . El biogás aprovechable es 6.803 kg de los cuales 0.631 kg se utilizan como gas domiciliario y 6.171 kg como gas para la cogeneración.

Se resalta que en la mayoría de los proyectos de digestores rurales para cocción solo se retira el H₂S, el agua no se descarta. El metro cubico necesario para cocción se refiere a un biogás que contiene metano (55-70%), dióxido de carbono (30-45%), sulfuro de hidrógeno (0.1-3%), agua (2-5%) y otras trazas [55]. En este estudio se utilizó para cocción la misma clase del biogás destinado para cogeneración.

Tabla 5-6 Flujo másico de las corrientes del diagrama de flujo de producción de biogás

No Corriente	Corrientes	Flujo (kg/día)
1	P cortados en el campo 30*30*10cm	540.000
2	P cortados 2*2*2cm	540.000
3	Biogás	7.095
4	Digerido	532.905
5	Biogás para quemar	0.000
6	Biogás para purificar	7.095
7	Digerido sólido	106.581
8	Digerido líquido	426.324
9	H ₂ S retirado	0.001
10	Biogás sin H ₂ S	7.093
11	Gases de combustión de la tea	0.000
12	Agua condensada del biogás	0.291
13	Biogás seco sin H ₂ S	6.803
14	Biogás para cocción	0.631
15	Biogás para cogeneración	6.171
16	Aire para combustión en cogenerador	130.634
17	Gases de combustión del cogenerador	136.804

En general, los digestores se sitúan a no más de 10 m del lugar de uso final con la intención de que el biogás salga con la presión suficiente en la estufa. En el proyecto propuesto se considera un compresor para mantener almacenado el biogás en cilindros de gas, de esta forma el digestor se puede situar en otro espacio considerando aspectos diferentes a la distancia entre la producción y su uso final.

Como medida de seguridad debe existir una chimenea para quemar el biogás cuando no se utiliza y no liberar CH₄ a la atmosfera. En los balances no se destinó un flujo de biogás para quemar, todo el gas es aprovechable.

El digerido se separa en dos fases, el biol que corresponde a la fracción líquida y el biosol que es la fracción sólida. Dependiendo de la humedad del sustrato o el agua adicionada para diluir la mezcla se obtiene la fracción de biol. En el caso del P, un residuo con una humedad superior al 90 %, la cantidad de biol equivale a aproximadamente el 80 % del digerido extraído. El porcentaje restante en el biosol. Este último se composta para su uso como fertilizante sólido. El biol también es un fertilizante.

Tabla 5-7 Balance de masa por etapa

Equipo	Entrada	Flujo (kg/día)	Salida	Flujo (m3/día)
Digestor Anaeróbico	2	540.00	3	7.09
			4	532.90
Total		540.00		540.00
Filtro	4	532.90	7	106.58
			8	426.32
Total		532.90		532.90
Torre Desulfuradora	6	7.09	9	0.002
			10	7.094
Total		7.09		7.09
Condensador	10	7.09	12	0.29
			13	6.80
Total		7.09		7.09
Tanque a presión	13	6.80	14	0.63
			15	6.17
Total		6.80		6.80
Cogenerador	15	6.17	17	136.80
	16	130.63		
Total		136.80		136.80

La torre desulfuradora tiene un lecho de óxido de hierro que reacciona con el H₂S para limpiar el biogás de este gas corrosivo. Antes de retirar agua o cualquier otro compuesto, es necesario retirar el H₂S para evitar la corrosión de los equipos por donde circule.

Tabla 5-8 Balance de masa global de la planta de producción de biogás

Corriente entrada	Flujo (kg/día)	Corriente salida	Flujo (kg/día)
1	540.00	7	106.58
16	136.63	8	426.32
		9	0.002
		12	0.29
		14	0.63
		17	136.80
Total	670.63		670.63

5.3.2 Balance de energía

El balance de energía se basa en información existente y comercial de los equipos utilizados para la planta teniendo en cuenta la cantidad de P, digerido, biogás procesado y las condiciones de operación del proceso (ver Tabla 5-9).

Tabla 5-9 Requerimiento de energía eléctrica de los equipos para la planta de biogás rural

Proceso asociado	Equipo	Código	Cantidad procesada (kg)	Potencia (kw)	Tiempo (h)	Consumo (kWh e)
Reducción de tamaño de partícula	Triturador	TR-101	540	1.12	1	1.12
Digestión anaerobia	Agitador	A-101	4723*	0.25	5	1.25
Digestión anaerobia	Bomba	B-101	532	0.75	0.17	0.12
Almacenamiento del biogás purificado	Compresor	C-101	6.80	2.01	0.47	0.95
Total						3.44

*incluye la masa del sustrato e inóculo calculado de acuerdo a la relación de sólidos volátiles utilizada en este estudio. Sin embargo, en plantas de gran tamaño esta relación es diferente, y se incrementa la carga orgánica del sustrato.

Otros equipos como el condensador requieren de energía térmica. La energía perdida en el condensador fue 0.21 kWh.

$$Q_{condensador} = F_{H_2O} \times L_v = 0.291 \frac{kg}{día} \times 2260 \frac{kJ}{kg} = 756.87 \frac{kJ}{día} = -0.21 kWh$$

El cogenerador tiene una eficiencia eléctrica del 30 % y una eficiencia térmica del 52 %. Con esta información se calculó la energía de los 540 kg de P procesados a partir del calor de reacción y el calor de los gases de combustión.

El calor de reacción es 46.1703 kWh ($Q_{reacción}$) y el calor de combustión 22.19 kWh dando en total 68.36 kWh equivalente a 13.85 kWh de energía eléctrica y 24.00 kWh de energía térmica.

Balance global de energía eléctrica del proceso

$$E_{cogenerador} - E_{triturador} - E_{agitador} - E_{bomba} - E_{compresor} = E_{disponible}$$

$$13.85 kWh - 1.12 kWh - 1.25 kWh - 0.12 kWh - 0.95 kWh = 10.40 kWh$$

Balance global de energía térmica del proceso

$$Q_{cogenerador} - Q_{condensador} = Q_{disponible}$$

$$24.00 kWh - 0.21 kWh = 23.79 kWh$$

Los requerimientos energéticos de la familia campesina más los requerimientos de los equipos de la planta suman en total 6.26 kWh, este valor se cubre con la energía eléctrica suministrada por el biogás producido con 540 kg de P.

La energía obtenida en la DA del P es 1 m³ de biogás utilizado para la cocción, 13.85 kWh de energía eléctrica y 24.00 kWh de energía térmica. la relación de la energía eléctrica obtenida con la energía eléctrica necesaria para cubrir los requerimientos de la familia campesina y de la planta de biogás es de 2.21. Como resultado, 7.5 kWh quedan disponibles para otras actividades que requieran electricidad o aumentar el uso de las actividades descritas en la Tabla 5-1. Cuando se quiera obtener solo la energía necesaria (6.26 kWh), es decir una relación de 1 entre la energía generada y la requerida, la cantidad de sustrato se disminuye a la mitad, en consecuencia, el terreno de plantación y el tiempo de trabajo en corte del P se reduce a la mitad. Si, por el contrario, hay mayor demanda de energía, el uso de 810 kg de P (6 plantas de banano) producirían 21.48 kWh ee.

La disponibilidad de la energía térmica del proceso es 23.79 kWh. Esta energía se puede utilizar para mantener la temperatura del digestor, para el secado del biosol, como calefacción en invernaderos u otro proceso productivo que la requiera. Su utilización puede necesitar otros equipos, sin embargo, para este caso de estudio solo se seguirá evaluando los equipos presentados en la Figura 5-2.

Un aspecto importante para recalcar es la pertinencia de estos proyectos para la sustitución progresiva de leña en el país, como se mencionó en la introducción de este capítulo, el uso de la leña para cocción es responsable de la mayoría de las enfermedades pulmonares. La contaminación del aire interior tiene asociado costos por mortalidad y atención de enfermedades pulmonares (0.38 % del PIB en 2005 y 0.22 % en 2009) [140].

5.3.3 Estimación de costos

La estimación de costos por el método de porcentaje del costo del equipo [146] es uno de los más completos y globalmente aceptado para la evaluación de proyectos y diseño de plantas. Tal y como se describió en el numeral 5.2.3 *Evaluación económica*, este método incluye el costo de tierra, personal de operación y supervisión, administración, investigación y desarrollo, estos costos no se consideran por el tamaño del proyecto, cuyo fin es autoconsumo en una zona rural, donde el operario y supervisor es el mismo usuario, solo se contemplan gastos de equipos, mantenimiento y orientación sobre el manejo y control de la planta en general. El costo del equipo se determinó considerando su precio por tonelada de P, digerido, inóculo o m³ biogás tratado o procesado de acuerdo con la información de la FAO para el 2017 (ver Tabla 5-10). El triturador, el filtro, el condensador y los cilindros de gas se cotizaron en catálogos y paginas especializadas en estos equipos como

homecenter considerando las especificaciones del proceso. La tasa de cambio utilizada para los cálculos fue 3770 COP equivalente a 1 dólar.

Tabla 5-10. Costos de equipo por cantidad de materia prima o producto procesado

Equipo	Unidad	Costo (USD)
Tanque de almacenamiento	USD/ m ³ biogás	87.1
Triturador	USD/ t P	364.8
Digestor	USD/ m ³ biogás	174.6
Agitador	USD/ t P e inóculo	2.0
Bomba	USD/ t digerido	4.5
Filtro	USD/ m ³ biogás	15.9
Torre desulfuradora	USD/ m ³ biogás	0.9
Condensador	USD/ m ³ biogás	48.7
Compresor	USD/ m ³ biogás	36.4
Tanque de presión	USD/ m ³ biogás	4.2
Cogenerador	USD/kW	650.0

Fuente: adaptado de [148]

Una vez se conoce el costo de los equipos por unidad de material tratado, se realiza un ajuste sobre los costos de construcción civil (Fcc), instalación (Fi), instrumentación y control (Fic), tubería (Fp), cableado eléctrico (Fe), adecuaciones en el lugar (Fa) y contingencia (Fco) (ver Tabla 5-11).

Tabla 5-11 Factores para determinar el costo final de la maquinaria y equipo

Equipo	Fi	Fic	Fp	Fe	Fcc	Fa	Fco
Tanque de almacenamiento	1.88	1.6					
Triturador	1.83	2.3		1.00			
Digestor anaeróbico	1.44	2.60	3.10	1.00	2.90		1.18
Agitador	1.32	2.60		1.00			
Chimenea	1.24	2.60	3.10				
Bomba	2.80	2.60	3.10	1.00			
Filtro	1.69	2.4				2.8	
Torre desulfuradora	1.72	2.60	3.10	1.00		1.20	
Condensador	1.62	2.60	3.10				
Compresor	1.49	2.60	3.10	1.00			
Tanque de presión		1.6					
Unidad de cogeneración	2.31	2.60		1.00		1.20	1.18

Fuente: [145][149]

Fi: factor de instalación, Fic: factor instrumentación y control, Fp: factor tubería, Fe: factor equipo eléctrico y materiales, Fcc: factor construcción civil, Fa: factor adecuaciones del lugar, Fco: factor contingencia.

Con esta información se realizan todos los cálculos para obtener la inversión total del proyecto (ver la

Tabla 5-12, Tabla 5-13, Tabla 5-14, Tabla 5-15 y Tabla 5-16). Los costos fijos dieron una suma de 123.821.369 COP, los costos de materia prima fue 1.272.000 COP, los costos directos contemplando el consumo de energía de los equipos, los operarios de la planta y los jefes de planta y laboratorio es 50.912.930 COP, sin embargo, los proyectos de autoabastecimiento energético no contemplan estos ítems, por tanto, los costos directos reales serían 7.536.953 COP. Los costos indirectos totalizaron 44.823.335 COP. Finalmente, los costos de manufactura fueron 53.632.288 COP para una inversión total de 117.453.657 COP.

Tabla 5-12. Costos fijos del lugar y la construcción de la planta de biogás rural para producir gas domiciliario y cogeneración para una familia campesina

Equipo	Costo (COP)	Fi	Fic	Fp	Fe	Fcc	Fa	Fco	Costo total (COP)
TK-101	2.698.783	1,88	0,16						3.510.577
TR-101	1.150.000	1,83	0,26		0,10				1.204.717
R-101	5.409.959	1,44	0,26	0,31	0,10	0,29		1,18	5.431.446
A-101	35.740	1,32	0,26		0,10				36.966
B-101	9.041	2,80	0,26	0,31					11.081
CH-101	30.465.854	2,80	0,26	0,31	0,10				31.153.407
F-101	492.660	1,69	0,24				0,28		548.610
T-101	4.670.364	1,72	0,26	0,31	0,10		0,12		4.678.133
E-101	38.221.892	1,62	0,26	0,31					43.212.600
C-101	314.984	1,49	0,26	0,31	0,10				318.766
TK-102	119.999		0,16						139.199
MC-101	17.386.807	2,31	0,26	0,26	0,10		0,12	1,18	17.425.252
Subtotal									107.670.755
Tierra (0 %)									0
Construcción (15 %)									16.150.613
Total costos fijos									123.821.369

La cantidad de óxido de hierro utilizado en la torre desulfuradora se calculó estequiométricamente de acuerdo a la siguiente reacción:

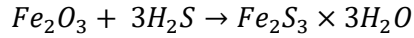


Tabla 5-13 Costos de materia prima de la planta de biogás rural para producir gas domiciliario y cogeneración para una familia campesina

Materia Prima	Cantidad (t/año)	Costo (COP/t)	Costo (COP)
Inóculo	4.2	300.000*	2.940.000
Pseudotallo	194.4	0	0
Agua		0	0
Catalizador para lecho torre desulfurizadora	0.0006	20.000.000	12.000
Total			1.272.000

*información suministrada por el ingeniero de Alpina.

El P no tiene ningún valor, es un residuo que pertenece al usuario y quien puede disponer de él. El agua corresponde a la utilizada en el condensador, a este líquido no se le asignó ningún valor debido a que el estudio de caso se sitúa en un lugar a orillas de un río, sin embargo, su uso desde una fuente hídrica está condicionado por permisos ambientales otorgados por la corporación ambiental competente y cuya diligencia y aval tiene un costo de cerca de 5 M COP.

Tabla 5-14 Costos directos de la planta de biogás rural para producir gas domiciliario y cogeneración para una familia campesina

Equipo	Potencia (kW)	tiempo (h)	Consumo (kWh)	Costo (COP)*
Triturador	1,12	1,00	403,20	69.754
Agitador	0,25	5,00	450,00	77.850
Bomba	0,75	0,17	45,90	7.941
Compresor	2,01	0,47	340,09	58.836
Subtotal electricidad				214.380
Equipo	Código	Fw	Costo, **(COP/operario/año)	
Tanque de almacenamiento	TK-101	0,5	\$ 18.000.000	
Triturador	TR-101	0,2		
Digestor anaerobico	R-101	0,1		
Agitador	A-101	0		
Bomba	B-101	0,1		
Chimenea	CH-101	0		
Filtro	F-101	0,1		
Torre desulfuradora	T-101	0,3		
Condensador	E-101	0,1		
Compresor	C-101	0,5		
Tanque de almacenamiento a presión	TK-102	0		
Unidad de cogeneración	MC-101	0,5		
Subtotal labor operacional		2,4	43.200.000	
Cargo	Fw	Costo (\$/dia)	Costo (\$/año)	
Jefe de Planta	1	\$ 0	0	
Supervisor	1	\$ 0	0	
Analista de laboratorio	1	\$ 0	0	
Subtotal labor supervisión			0	
Personal administrativo, otros.			0%	
Subtotal sesrvicio			0	
Mantenimiento de equipos y maquinaria (7 %)			\$ 7.498.550	
Total costos directos			\$ 50.912.930	

*considera el precio del kWh para zonas rurales como 173 COP [147] **considera el día de trabajo en 49.322 COP, de acuerdo al SMLV para el 2020 en Colombia.

Tabla 5-15 Costos indirectos de la planta de biogás rural para producir gas domiciliario y cogeneración para una familia campesina

Ítem	Factor (%)	Costo (COP/año)
Depreciación maquinaria y equipo	10	10.767.076
Depreciación construcción	5	807.531
Impuestos	0.2	32.301
Seguros	2	323.366
Costos generales de la planta	15	1.130.543
Contingencia	35	43.337.664
Total		44.823.335

El ítem del costo de manufactura incluye el valor del costo a granel más los costos de la materia prima, por tanto, estos dos no se totalizan, sino que el valor final es el del ítem de costo de manufactura.

Tabla 5-16 Costos de manufactura de la planta de biogás rural para producir gas domiciliario y cogeneración para una familia campesina

Ítem	Costo (COP/año)
Costo a granel	52.360.288
Costo de manufactura	53.632.288
Administrativo (0 %)	0
Costos de investigación y desarrollo (0 %)	0
Total	53.632.288

La inversión total del proyecto es de 227.380.194 COP. Cuando no se consideran los costos de mano de obra por operación en la planta, la inversión total es de 177.453.657 COP. Se mencionó que el usuario es el encargado del manejo de la planta. La inversión de la planta en alta, cabe mencionar que el método de estimación de costos involucra todos los aspectos a considerar en una planta comercial, por lo tanto, la inversión es mayor.

De acuerdo con la información de Preston [150], la instalación de una planta tubular de biogás, es una de la más adecuada para las zonas rurales del trópico y el costo estimado varía dependiendo de los materiales de construcción desde 40 USD/m³ para una planta de polietileno tipo salchicha [144] y de 300 USD/m³ para una planta de geotextil tipo salchicha (Información suministrada por Fedrik Johansson de FOV Fabrics AB Suiza).

Por ejemplo, una planta de 7 m³ varía entre USD 280 (planta artesanal tipo Taiwán o salchicha), a US\$ 2800 de geo textil, el valor de una planta domo fijo puede costar hasta US\$ 2100. El tiempo de vida de un biodigestor de polietileno tipo Salchicha varía entre 3-5 años, el de FOV (geotextil) hasta 15 años, el de geo membrana hasta 15 años y los de domo fijo hasta 35 años.

- Estimación de emisiones de CO₂

El costo de instalación de una planta de biogás y su mantenimiento son las principales barreras para ampliar la implementación de la tecnología en zonas rurales. En la evaluación de costos intervienen aspectos energéticos, e impactos positivos como la conservación del medio ambiente, mejoramiento de suelos, alimentación de animales y mejoramiento de la calidad de vida en el campo [55]. Estas externalidades positivas traen beneficios sociales y económicos que en la mayoría de los casos no se evalúan.

Los costos de capital dependen de la tecnología utilizada y de las necesidades auxiliares que se necesite como gas para la generación de energía eléctrica o como combustible.

En las zonas rurales colombianas los combustibles de mayor uso son la leña y el GLP. Considerando que 1 m³ de biogás es igual a 11 kg de leña, o 0.45 kg de GLP utilizado en cocción de alimentos, en la Tabla 5-17 se comparan las emisiones liberadas durante el uso de cada uno de estos combustibles.

Tabla 5-17. Emisiones de GEI asociadas al uso de combustibles en zonas rurales

	Biogás	Leña	GLP
Tiempo base (días)	365	365	365
Familias rurales (número)	1 164 421	1 164 421	1 164 421
Consumo para cocción (kg/familia*día)	0.631	11.0	0.45
Consumo (ton _{combustible} / familias _{rurales} *año)	268 183	4 675	191 256
Factor de emisión (kg _{CO2} /kg)	2.06	1.52	3.05
emisiones (ton _{CO2eq} /año)	552 458	7 293 234	583 331

Fuente: adaptado de [140]

Una planta que produce 1 m³ de biogás para cocción, al día se ahorra la compra o recolección de 11 kg (o 4 t/año) de leña o el pago de 0.45 kg de GLP que a un precio estimado de \$3.000/kg el ahorro

es de aproximadamente 1470/día COP o 540.000/año COP. Las emisiones netas de biogás para cocción y leña se consideran cero cuando se asume que el CO₂ liberado en la combustión es igual al CO₂ que tomó la biomasa durante su crecimiento.

La tecnología del biogás a diferencia de la leña y el GLP puede presentar un balance de CO₂ negativo cuando se contabilizan las emisiones evitadas por la producción de fertilizantes químicos al sustituir su uso por el biol y el biosol.

El CO₂ evitado al utilizar el biol, el cual no contiene compuestos químicos como urea y derivados de fósforo es de 212 kg_{CO₂eq}/año por m³ de biogás producido (ver Tabla 5-18). Por lo anterior, 1.1 millones de familias que cocinan exclusivamente con leña evitarían cerca de 247.000 ton_{CO₂eq}/año.

Tabla 5-18. Emisiones ahorradas por el uso de biofertilizante a cambio del fertilizante químico considerando la producción de 1 m³ de biogás.

Compuesto	Factor de emisión (kg_{CO₂}/kg)	Cantidad en el biol (kg/año)	Emisión (kg_{CO₂}/año)
N _{expresado} como urea	0.7	78.8	55.1
P _{expresado} como H ₃ PO ₄	2.2	71.6	157.6
Sulfatos	1.05		
Potasio		34.5	
Total			212.7

Fuente: adaptado de [151] [150]

En Colombia existen tasas o impuestos ecológicos como el referido en la ley 1819 de 2016 y el decreto 1951 de 2017, que establece el pago por tonelada de CO₂ en 15.000 COP [152]. Considerando los ahorros de CO₂ con la utilización del biogás y el digerido los ahorros monetarios son de alrededor de 3.705 millones COP/año.

En conclusión, las familias campesinas deben disponer de un combustible para cocinar, calentar e iluminar la casa, si se desea sustituir y evitar la recolección de leña. En este caso, el biogás es un buen combustible que cumple a cabalidad con los requisitos de no generación de humos e inquemados y deja menos expuestas a las mujeres y niños a este tipo de contaminantes que afectan la salud.

5.4 Conclusiones

Con base en el análisis técnico económico realizado para un hogar rural colombiano se concluye lo siguiente:

El acceso a energía eléctrica y gas natural es posible mediante la generación de biogás a partir de residuos de cosecha de banano. Estas zonas se encuentran ubicadas en zonas rurales con amplia extensión de terreno que permite la siembra de plantas de banano. Como primera recomendación la planta de biogás debe funcionar a condiciones mesofílicas, por ende, las zonas para implementar este tipo de proyecto deben ser en lugares con temperatura promedio superior a 27 °C.

Los requerimientos energéticos en estas zonas pueden exceder de 1 m³ de metano para cocción y 2.81 kWh para el uso de electrodomésticos en el hogar para iluminación, entretenimiento, comunicación y educación en pro del mejoramiento de la calidad de vida y el desarrollo en el campo. Esta cantidad se cubre con la energía obtenida de 540 kg de P resultantes del corte de 4 plantas de banano y deja disponible 7.58 kWh. Por tanto, se considera asequible para familias que viven en el campo y cuentan con un terreno de 0.3-0.6 ha para la plantación.

Para adquirir una planta con las características descritas la inversión debe ser de \$177 millones de pesos. Valor que debido a los usuarios dirigidos debe ser subsidiado, ya que individualmente una familia recaudaría un bono de 7.200 COP/año y 3 368 COP/año por evitar 475 kgCO₂/año y 213 kgCO₂/año por el uso de biogás y del digerido orgánico. Esta es la razón que en distintos países existan los planes nacionales de biogás como herramienta y canal para generar acceso a la energía eléctrica y el gas combustible a partir de biogás.

6 Conclusiones y recomendaciones

6.1 Conclusiones

En este trabajo de maestría se evaluó la posibilidad del uso de la FORSU y RCB como sustratos en la digestión anaerobia. Cada conclusión esta enlazado a los objetivos propuestos en este trabajo (ver Capitulo 1).

Objetivo 1

La fracción orgánica de residuos sólidos urbanos es una biomasa apta para los procesos de digestión anaerobia por sus características fisicoquímicas. Presentó un rendimiento de 534.52 L_{CH₄}/kg SV y alto contenido de H₂S, el cual puede afectar la población metanogénica y favorece el desarrollo de las bacterias sulforreductoras. Por otra parte, el pseudotallo y raquis son residuos de cosecha que pueden considerarse una fuente promisorio de biomasa para la producción de metano, aunque su degradabilidad sea menor al de la FORSU, tienen rendimientos (363.52 y 202.19 L_{CH₄}/kg SV) superiores a otras biomasas lignocelulosicas, y con la ventaja de presentar baja concentración de H₂S.

Objetivo 2

El pretratamiento con explosión con vapor fue efectivo para el aumento del rendimiento de metano en la codigestion de la fracción orgánica de residuos sólidos urbanos, pseudotallo y raquis. Después de pretratar el P y R a 180 °C durante 10 min se obtuvo un incremento del 25 % del rendimiento de metano con respecto a la codigestión con el material crudo. No obstante, no hubo un efecto sinérgico, el rendimiento de metano de la monodigestión de la FORSU fue superior a todas las codigestiones estudiadas. Por lo tanto, se recomienda un ajuste en la adecuación del material y el estudio de otras condiciones del pretratamiento con el fin de conseguir un efecto sinérgico.

Objetivo 3

Mediante un diseño básico de ingeniería se demostró la viabilidad de una planta de biogás rural para satisfacer los requerimientos básicos energéticos de una familia. La energía obtenida por la digestión anaerobia de los residuos de cosecha de banano es superior a la energía consumida por el usuario y los equipos involucrados en el proceso de digestión, teniendo una sobreproducción de 7.58 kWh cuando se utilizan 4 plantas de banano. La cantidad de sustrato justo para la demanda energética establecida para la familia y los equipos se cubre con el residuo de dos plantas de banano.

6.2 Recomendaciones

Con el propósito de hacer uso de los datos obtenidos en este trabajo, a continuación, se exponen algunas recomendaciones que contribuirán a ampliar los conocimientos adquiridos en este estudio.

- Evaluar mayores factores de severidad para el aumento de la biodegradabilidad del P y R, considerando la humedad de la biomasa.
- Evaluar otros cosustratos para P y R que mejoren su cinética de degradación pero que además se produzca efectos sinérgicos.
- Evaluar pretratamientos conjuntos de la biomasa lignocelulósica, como previa extracción del jugo orgánico del material húmedo y posterior explosión con vapor del material exprimido. Además, el uso de este jugo en el digestor.
- Estudiar la codigestión de FORSU-P-R en semicontinuo para establecer parámetros de carga orgánica y evaluar el digerido.
- Realizar un análisis técnico económico sobre los costos de una planta de explosión de vapor con el fin de conocer la conveniencia del pretratamiento para P y R bajo diferentes escenarios como en zonas urbanas y rurales.
- Realizar una evaluación financiera para determinar el precio de un kWh de biomasa proveniente de un proceso de digestión anaerobia y pretratada con SE.
- Estudiar y determinar las emisiones del proceso como un factor importante en la viabilidad de un proyecto de digestión anaerobia a partir de RCB pretratados
- Aumentar la escala de experimentación con el fin de obtener datos escalables a nivel industrial.

7 ANEXOS

A. Anexo: Análisis estadístico

I. Ensayos de codigestión FORSU-Pseudotallo-Raquis

- Prueba de normalidad Shapiro Wilk

Muestra	Codigestión	Variable		Shapiro Wilk	
		Rendimiento	Obs	P	
1	FORSU+R180+P160	676,250			
1	FORSU+R180+P160	688,250			
1	FORSU+R180+P160	599,350	3	0.238	
2	FORSU+R180+P180	704,950			
2	FORSU+R180+P180	643,150			
2	FORSU+R180+P180	779,150	3	0.899	
3	FORSU+R200+P160	666,850			
3	FORSU+R200+P160	706,750			
3	FORSU+R200+P160	700,550	3	0.276	
4	FORSU+R200+P180	708,55			
4	FORSU+R200+P180	647,050			
4	FORSU+R200+P180	685,550	3	0.724	
5	FORSU+R+P	468,550			
5	FORSU+R+P	520,550			
5	FORSU+R+P	498,550	3	0.830	

El valor de probabilidad fue superior a 0.05 en todos los casos, es decir, son datos que tienen una distribución normal.

- Prueba homogeneidad de varianzas

Biomasa	Prueba de Levene			
	Estadístico	gl	gl	Pr>F
Rendimiento (L _{CH4} /kg SV)	1.22	4	10	0.36
	0.57	4	10	0.68
	1.22	4	10	0.36

El nivel de significancia (p) fue mayor a 0.05, por tanto, se acepta la hipótesis nula de homogeneidad de varianzas. En consecuencia, todos los datos pueden analizarse utilizando la ANOVA.

- Análisis de varianza (ANOVA)

- Muestras M1 a M5

	SS	gl	MS	F	P>F
Entre grupos	89490.79	4	22372.69	12.33	0.0007
Intra grupos	18143.11	10	1814.31		
total	107633.90	15	7688.13		

Dado que p es menor a 0.05 se rechaza la hipótesis nula y se concluye que existe diferencia significativa en al menos una media con respecto a la de otro grupo.

- Muestras M1 a M4

	SS	gl	MS	F	P > F
Entre grupos	4680.23	3	1560.07	0.74	0.56
Intra grupos	16780.44	8	2097.55		
total	21460.67	11	1950.97		

Dado que p es mayor a 0.05 se acepta la hipótesis nula y se concluye que no existe diferencia significativa en las medias.

B. Anexo: Mapa de zonificación

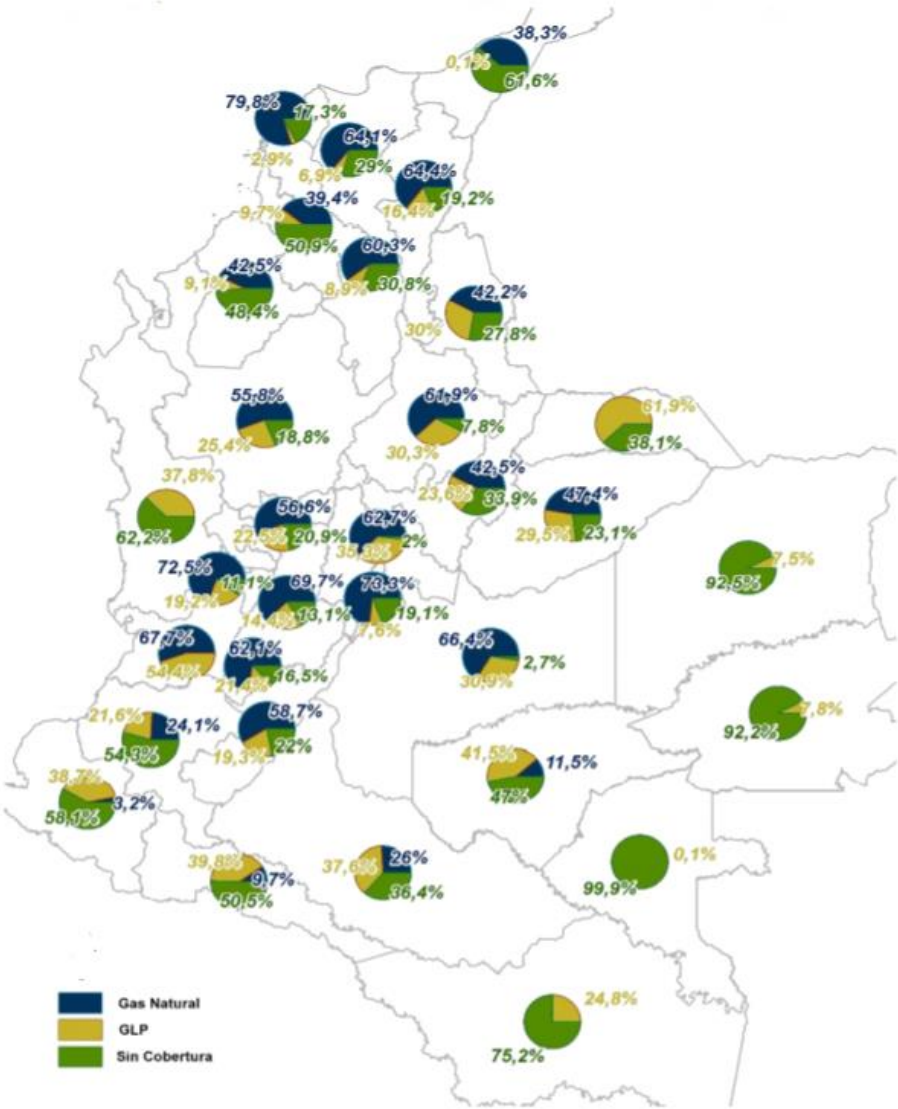


Figura 7-1. Índices de cobertura de gas combustible en Colombia año 2017. Cobertura de gas natural en azul. Cobertura de Gas Licuado de Petróleo (GLP) en amarillo, y sin cobertura en verde.

Fuente: [138]

C. Anexo: Cálculos de balance de masa para la planta de biogás rural

- Digestor anaeróbico

La cantidad de pseudotallo alimentado se determinó de acuerdo a los requerimientos energéticos. El potencial de biogás se estableció como un 70 % del obtenido experimentalmente, dado que el dato experimental es el máximo potencial de metano y en planta puede verse disminuido hasta en un 50 %.

Corriente 2: Pseudotallo triturado

Una planta de banano de la especie *Musa acuminata* da un racimo que en promedio pesa 45 kg. Cada tonelada de banano genera 3 toneladas de pseudotallo. El valor experimental obtenido en el Capítulo 3 fue: máximo potencial de metano del pseudotallo $15.22 \text{ m}^3_{\text{CH}_4}/t_{bh}$

Considerando lo anterior, para cubrir los requerimientos energéticos de la familia campesina y los equipos de la planta es necesaria la energía suministrada por 540 kg de pseudotallo (F_P), equivalente a 4 plantas de banano.

Corriente 3: Biogás

Teniendo en cuenta el rendimiento de metano obtenido a partir de pseudotallo, correspondiente al 70 % del biogás, el total de biogás producido es:

$$V_{biogás} = 0.54 \frac{t_{bh}}{día} * 15.22 \frac{m^3_{biogás}}{t_{bh}} = 8.22 \frac{m^3_{biogás}}{día}$$

El proceso de digestión anaerobia se llevó a cabo a 37 °C, como resultado la masa del biogás producido fue 7.095 kg/día. El peso molecular (PM) se calculó utilizando las fracciones molares de cada compuesto en la mezcla a la salida del digestor.

$$F_{biogás} = \frac{PV(PM)}{RT} = \frac{1 \text{ atm} \times 8220 \frac{L_{biogás}}{día} \times 0.021945 \frac{kg}{mol}}{0.082 \frac{atm \cdot L}{mol \cdot K} \times 310K} = 7.095 \frac{kg}{día}$$

La composición determinada experimentalmente se presenta en la Tabla 7-1 y es utilizada para los cálculos en la torre desulfuradora.

Tabla 7-1 Composición del biogás a la salida del digestor anaerobio

Componente	% (V/V)
CH ₄	70.00
CO ₂	21.00
O ₂	0.00
H ₂ S	1.51*10 ⁻²
H ₂ O	5.00
N ₂	2.00
H ₂	1.98

Corriente 4: Digerido

El digerido sale en forma de biol (fracción líquida) y biosol (fracción sólida). La fracción líquida se determina por la cantidad de agua que entra para realizar el ajuste de sólidos totales. En el caso del pseudotallo no fue necesario la adición de agua. La fracción de biol y biosol se asumió como 80 % y 20 % respectivamente.

$$F_{digerido} = \frac{540 \frac{kg_{bh}}{día}}{1.013} = 532.91 \frac{kg_{bh} \text{ digerido}}{día}$$

$$532.91 \frac{kg_{bh}}{día} * 0.8 = 426.32 \frac{kg_{bh} \text{ biol}}{día}$$

$$532.91 \frac{kg_{bh}}{día} * 0.2 = 106.58 \frac{kg_{bh} \text{ biosol}}{día}$$

Balance global en el digestor

$$F_p - F_{biogás} - F_{digerido} = 0$$

$$540 \frac{kg_{bh}}{día} - 7.095 \frac{kg}{día} - 532.905 \frac{kg_{bh}}{día} = 0$$

- Torre desulfuradora

El biogás de entrada a la torre tiene 151 ppm, y el biogás de salida debe tener 10 ppm. Por tanto, se determina la cantidad de H₂S que se debe retirar considerando para los 151 ppm la composición de entrada y para los 10 ppm la composición de salida del biogás.

Corriente 9: H₂S retirado

El primer paso es determinar la masa del H₂S del biogás de entrada a la torre (F_{H_2S1}). Con esta información se conoce la masa del biogás cuando se retira el 100 % de este compuesto, sin embargo, a la salida la composición del H₂S es 10 ppm.

$$V_{H_2S1} = 8.22 \frac{m_{biogás}^3}{día} \times 0.000151 = 0.00124 \frac{m_{H_2S}^3}{día}$$

$$F_{H_2S1} = \frac{PV(PM)}{RT} = \frac{1 \text{ atm} \times 1.24 \frac{L_{H_2S}}{día} \times 0.034 \frac{kg}{mol}}{0.082 \frac{atm \cdot L}{mol \cdot K} \times 310K} = 0.0016 \frac{kg}{día}$$

$$V_{H_2S2} = 8.22 \frac{m_{biogás}^3}{día} \times 0.00001 = 0.00008 \frac{m_{H_2S}^3}{día}$$

$$F_{H_2S2} = \frac{PV(PM)}{RT} = \frac{1 \text{ atm} \times 0.0822 \frac{L_{H_2S}}{día} \times 0.034 \frac{kg}{mol}}{0.082 \frac{atm \cdot L}{mol \cdot K} \times 310K} = 0.00011 \frac{kg}{día}$$

$$F_{H_2S(\text{retirado})} = F_{H_2S1} - F_{H_2S2} = 0.0016 \frac{kg}{día} - 0.00011 \frac{kg}{día} = 0.0015 \frac{kg}{día}$$

Corriente 10: Biogás purificado

$$F_{biogás1} = F_{biogás} - F_{H_2S(\text{retirado})} = 7.095 \frac{kg}{día} - 0.001 \frac{kg}{día} = 7.094 \frac{kg}{día}$$

Balance global en la torre desulfurizadora

$$F_{biogás} - F_{H_2S} - F_{biogás1} = 0$$

$$7.095 \frac{kg}{día} - 0.001 \frac{kg}{día} - 7.094 \frac{kg}{día} = 0$$

- Condensador

La concentración de agua en el biogás de salida del digestor es del 5%. A partir de esta información se calcula la masa de agua condensada.

Corriente 12: agua condensada

$$V_{H_2O} = 8.22 \frac{m^3_{biogás}}{día} \times 0.05 = 0.411 \frac{m^3_{H_2O}}{día}$$

$$F_{H_2O} = \frac{PV(PM)}{RT} = \frac{1 \text{ atm} \times 411 \frac{L_{H_2O}}{día} \times 0.018 \frac{kg}{mol}}{0.082 \frac{atm \cdot L}{mol \cdot K} \times 310K} = 0.291 \frac{kg}{día}$$

Corriente 13: biogás seco purificado

$$F_{biogás.seco} = F_{biogás1} - F_{H_2O} = 7.094 \frac{kg}{día} - 0.291 \frac{kg}{día} = 6.803 \frac{kg}{día}$$

Balance global en el condensador

$$F_{biogás1} - F_{biogás.seco} - F_{H_2O} = 0$$

$$7.094 \frac{kg}{día} - 6.803 \frac{kg}{día} - 0.291 \frac{kg}{día} = 0$$

- Cogenerador

Al cogenerador entra el biogás seco purificado que contiene básicamente metano. 1 m³ del gas se destina para la cocción y el resto se introduce al cogenerador. El peso molecular se calculó considerando la nueva composición del biogás al ingreso del cogenerador (ver Tabla 7-2).

Tabla 7-2. Composición del biogás a la entrada del cogenerador

Componente	% (V/V)
CH ₄	73
CO ₂	22
H ₂ S	1.00*10 ⁻²
H ₂ O	0
N ₂	2
H ₂	2

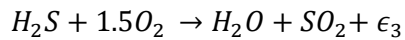
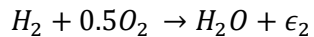
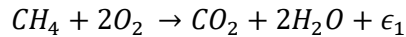
Corriente 15: biogás para cogeneración

$$F_{\text{biogás.cocci3n}} = \frac{PV(PM)}{RT} = \frac{1 \text{ atm} \times 0.001 \frac{\text{L}_{\text{H}_2\text{O}}}{\text{día}} \times 0.0221 \frac{\text{kg}}{\text{mol}}}{0.082 \frac{\text{atm} \cdot \text{L}}{\text{mol} \cdot \text{K}} \times 310\text{K}} = 0.631 \frac{\text{kg}}{\text{día}}$$

$$F_{\text{biogás.cogeneracion}} = F_{\text{biogás.seco}} - F_{\text{biogás.cocci3n}} = 6.803 \frac{\text{kg}}{\text{día}} - 0.631 \frac{\text{kg}}{\text{día}} = 6.172 \frac{\text{kg}}{\text{día}}$$

Corriente 16: aire para combustión

El aire de entrada se determina estequiométricamente y con un exceso superior al 50 %, con el propósito de obtener una relación de aire/combustible de 20, la cual se considera adecuada para cogeneradores que trabajan con biogás (ver Tabla 7-3 y Tabla 7-4). Las reacciones involucradas en la combustión son:



Donde ϵ_1 , ϵ_2 y ϵ_3 son los avances de la reacción y se consideran en los balances.

Tabla 7-3. Oxígeno teórico para combustión en cogenerador

Componente	Masa (Kg)	kmol	Oxígeno teórico (Kmol)
CH ₄	3.285	0.205	0.411
CO ₂	2.710	0.062	0.000
H ₂ S	1.000*10 ⁻⁴	2.900*10 ⁻⁶	4.400*10 ⁻⁶
N ₂	0.164	0.006	0.000
H ₂	0.011	0.006	0.002
Total			0.414

Tabla 7-4. Aire de combustión real considerando exceso de aire

Componente	kmol	Masa (Kg)
O ₂	0,951	30,43
N ₂	3,578	100,19
Total		130.63

El valor de F_{aire} es igual a 130.63 Kg/día.

Corriente 17: gases de combustión

Los gases de combustión se determinan de acuerdo a la Ecuación 7-1 (ver Tabla 7-2 y Tabla 7-3).

$$n_i = n_{i,0} - \sum \vartheta_{i,j} \epsilon_j \quad \text{Ecuación 7-1}$$

Donde n_i es el número de moles que salen de cada compuesto después de la combustión, $n_{i,0}$ es el número de moles de cada compuesto al ingreso del cogenerador, $\vartheta_{i,j}$ es el coeficiente estequiométrico del compuesto y ϵ_j es el avance de la reacción.

Tabla 7-2 Valores de los avances de reacción utilizando el compuesto asignado para su cálculo

Compuesto	Avance de la reacción	Avance (Kmol)	Avance (Kg)
CH ₄	E1	0.195	3.121
H ₂ S	E2	2.786*10 ⁻⁶	9.474*10 ⁻⁵
H ₂	E3	0.005	0.011

Tabla 7-3 Masa de los gases de combustión para las 3 reacciones establecidas

Componente	$n_{i,0}$ (kmol)	n_i (Kmol)	Masa (kg)
CH ₄	0.205	0.010	0.164
CO ₃	0.062	0.257	11.292
H ₂ S	2.900*10 ⁻⁶	1.000*10 ⁻⁷	5.000*10 ⁻⁶
H ₂ O	0.000	0.401	7.221
N ₂	0.006	0.006	0.163
H ₂	0.005	0.000	0.001
SO ₂	0.000	0.000	1.800*10 ⁻⁴
O ₂ aire	0.951	0.558	17.865
N ₂ aire	3.578	3.578	100,193
Total		4.811	136.80

El valor de $F_{\text{gases.combustión}}$ es igual a 136.8 kg/día

Balance global en el cogenerador

$$F_{\text{biogas.cogeneración}} - F_{\text{aire}} - F_{\text{gases.combustión}} = 0$$

$$6.17 \frac{kg}{día} + 130.63 \frac{kg}{día} - 136.80 \frac{kg}{día} = 0$$

Balance de masa global del proceso

$$F_p + F_{aire} - F_{digerido} - F_{H_2Sretirado} - F_{H_2O} - F_{biogás.cocción} - F_{gases.combustión} = 0$$

$$540 \frac{kg_{bh}}{día} + 130.63 \frac{kg_{bh}}{día} - 532.91 \frac{kg}{día} - 0.0015 \frac{kg}{día} - 0.29 \frac{kg}{día} - 0.63 \frac{kg}{día} - 136.80 \frac{kg}{día} = 0$$

D. Anexo: Cálculos de balance de energía para la planta de biogás rural

El consumo de energía eléctrica de los equipos está basado en información comercial.

- Digestor anaeróbico

Los equipos involucrados alrededor del digestor que requieren de electricidad para su funcionamiento son la trituradora para la reducción del tamaño de partícula del pseudotallo, el agitador del reactor y la bomba de descarga del digerido (ver Tabla 7-5).

Tabla 7-5. Consumo eléctrico de los equipos de la planta de biogás

Requerimiento	Equipo	Masa procesada (kg)	Potencia (kW)	Tiempo de trabajo (h/día)	Consumo de energía eléctrica (kWh)
Reducción de tamaño de partícula	Triturador	540	1,12	1	1,12
Mezcla inóculo-sustrato	Agitador	4723	0,25	5	1,25
Descarga digerido	Bomba	533	0,75	0,17	0,13
Almacenamiento	Compresor	6.80	2.11	0.47	0.95
Total					3.44

- Condensador

La energía de pérdida en el condensador se calcula como el flujo másico de agua condensada por la entalpia del vapor de agua.

$$Q_{condensador} = F_{H_2O} \times L_v = 0.291 \frac{kg}{día} \times 2260 \frac{kJ}{kg} = 756.87 \frac{kJ}{día} = -0.21 kWh$$

- Cogenerador

La eficiencia eléctrica corresponde al 30 % y la eficiencia térmica al 52 %. Con esta información se calculó la energía de los 540 kg de pseudotallo procesados.

Calor de reacción: para cada reacción de combustión se calcula un calor de reacción (Q_1 , Q_2 y Q_3) como la sumatoria de la cantidad de moles de cada compuesto por su entalpia de formación (ver Tabla 7-6).

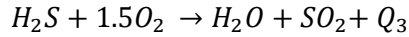
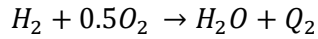
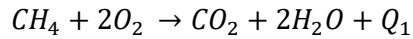


Tabla 7-6 Calor de reacción de la combustión de metano, hidrógeno y sulfuro de hidrógeno en el cogenerador

Calor	Reacción				Calor de reacción	
	Reactivos		Productos		KJ/día	kWh
Q1	CH ₄	O ₂	CO ₂	H ₂ O		
	205.326	410.653	205.326	410.653		
Q2	H ₂	O ₂	H ₂ O		-1407.980	-3.91E-01
	5.822	2.911	5.822			
Q3	H ₂ S	O ₂	SO ₂	H ₂ O	-1.644	-0.0004
	0.002	0.004	0.002	0.002		
Total						-46.1703

La energía del calor de reacción fue -46.1703 kWh ($Q_{\text{reacción}}$)

Calor de combustión: el calor de combustión se calculó considerando que la temperatura de salida de los gases estuvo a 500 °C.

Tabla 7-7 Capacidad calorífica de los gases de combustión

Gas	n_{final}	Xi	A	B	C	D	Cpi (KJ/Kgmol*K)	Cpm, (KJ/Kmol*K)
CH ₄	0,010	0,00	19,25	0,0521	1,20E-05	-1,13E-08	61,470	0,131
CO ₂	0,257	0,05	19,80	0,0734	-5,60E-05	1,71E-08	51,001	2,721
H ₂ S	0,000	0,00	31,94	0,0014	2,43E-05	-1,18E-08	42,150	0,000
H ₂ O	0,401	0,08	32,24	0,0192	1,06E-05	-3,60E-09	51,755	4,316
N ₂	0,006	0,00	31,15	-0,0135	2,68E-05	-1,17E-08	31,279	0,038
H ₂	0,000	0,00	27,14	0,0093	-1,38E-05	7,65E-09	29,608	0,002
SO ₂	0,000	0,00	23,85	0,0669	-4,96E-05	1,33E-08	52,124	0,000
O ₂ aire	0,558	0,12	29,10	0,0115	-6,08E-06	1,31E-08	40,476	4,697
N ₂ aire	3,578	0,74	31,15	-0,01357	2,68E-05	-1,17E-08	31,279	23,265
Total	4.81	1.00						35,171

Fuente: [153]

$$Q_{combustión} = n_{gases.combustion} \times C_{p,m} \times \Delta T$$

$$Q_{combustión} = 4.811 \frac{kmol}{día} \times 35.171 \frac{KJ}{kmol \cdot K} \times (773 - 301)K = 79866.02 \frac{KJ}{día} = 22.19 kWh$$

Por último, la energía total generada en el cogenerador es

$$Q_{total} = Q_{reacción} + Q_{combustión} = 46.17kWh + 22.19 kWh = 68.36 kWh$$

De acuerdo a la eficiencia del cogenerador la energía eléctrica obtenida es 13.85 kWh y la energía térmica 24.00 kWh.

Balance global de energía eléctrica del proceso

$$E_{cogenerador} - E_{triturador} - E_{agitador} - E_{bomba} - E_{compresor} = E_{disponible}$$

$$13.85 kWh - 1.12 kWh - 1.25 kWh - 0.12 kWh - 0.95 kWh = 10.40 kWh$$

Balance global de energía térmica del proceso

$$Q_{cogenerador} - Q_{condensador} = Q_{disponible}$$

$$24.00 kWh - 0.21 kWh = 23.79 kWh$$

Bibliografía

- [1] WWF, “Living Planet Report 2016 Risk and resilience in a new era,” Gland Suiza, 2016.
- [2] WWF, “Living Planet Report -2018 Aiming Higher,” Gland Suiza, 2018.
- [3] J. M. Martínez Rincon *et al.*, *Bioenergía: Fuentes, conversión y sustentabilidad*, La Red Ibe. Bogotá: CYTED, 2014.
- [4] BP, “BP Statistical Review of World Energy,” 2019.
- [5] Health Effects Institute, “State of Global Air 2019,” Boston, 2019.
- [6] S. Kaza, Y. Lisa, P. Bhada-Tata, and V. W. Frank, “What a Waste 2.0: A Global Snapshot of Solid Waste Management to 2050,” License: Creative Commons Attribution CC BY 3.0 IGO, Washington, DC, 2018.
- [7] C. Robles Algarin and O. Rodríguez Álvarez, “Un panorama de las energías renovables en el Mundo, Latinoamérica y Colombia,” in *Espacios*, vol. 39, 2018, p. 10.
- [8] IRENA, “Renewable capacity highlights,” no. March, pp. 1–2, 2019.
- [9] M. A. Planas Marti and J. C. Cárdenas, “La matriz energética de Colombia se renueva - Energía para el Futuro.” DIB, 2019.
- [10] UPME, “Integración de las energías renovables no convencionales en Colombia Integración de las energías en Colombia,” Bogotá, 2015.
- [11] J. J. C. Eras *et al.*, “A look to the electricity generation from non-conventional renewable energy sources in Colombia,” *Int. J. Energy Econ. Policy*, vol. 9, no. 1, pp. 15–25, 2019, doi: 10.32479/ijeeep.7108.
- [12] G. Acurio, A. Rossin, T. Paulo, and Z. Francisco, “Diagnostico de la situación del manejo de residuos sólidos municipales en America Latina y el Caribe,” Washigton D.C., 1997.
- [13] J. M. Rincón Martínez, D. M. Durán Hernández, O. Quintero Montoya, C. S. Duarte González, P. O. Guevara Patiño, and M. E. Velásquez Lozano, “Disponibilidad de

- biomasa residual y su potencial para la producción de biogás en Colombia,” pp. 16–25, 2018.
- [14] Mario Enrique Velásquez Lozano *et al.*, “Estimación del potencial de conversión a biogás de la biomasa y su aprovechamiento.” UPME, Unidad de Planeación Minero Energética, Bogotá, p. 216, 2017.
- [15] AGRONET and Ministerio de Agricultura, “Estadísticas home,” 2016. [Online]. Available: <https://www.agronet.gov.co/estadistica/Paginas/home.aspx?cod=1>. [Accessed: 07-May-2019].
- [16] N. Avendaño García Superintendente de Servicios Públicos Domiciliarios Bibiana Guerrero Peñarete Superintendente Delegada para Acueducto, A. Aseo Luisa Fernanda Camargo Sánchez, D. Carolina Guavita Duarte, C. Ximena Ramos Hidalgo, and A. Carolina Marú Ruiz Ángela Marcela Quintero Martínez Camilo Andrés Beltrán Garzón Heidy Camila Hernández Sánchez, “Informe de Disposición Final de Residuos Sólidos – 2017,” 2018.
- [17] ECO Consultorías e Ingeniería SAC, “Estudio de Caracterización Física de Residuos Sólidos Municipales en la Ciudad de Huancayo,” Huancayo, 2013.
- [18] A. P. Becerra-quiroy, A. L. Buitrago-coca, and P. Pinto-baquero, “Sostenibilidad del aprovechamiento del bagazo de caña de azúcar en el Valle del Cauca, Colombia,” 2016.
- [19] M. Shahbandeh, “Fruit: banana production worldwide by region 2017 | Statista,” 2019. [Online]. Available: <https://www.statista.com/statistics/264003/production-of-bananas-worldwide-by-region/>. [Accessed: 01-Nov-2019].
- [20] Ministerio de Minas y Energía, “Atlas del potencial energético de la biomasa residual en Colombia,” Bogotá, 2010.
- [21] J. M. Rincón *et al.*, “Formulación De Instrumentos Técnicos Que Estimulen El Aprovechamiento De La Biomasa En La Generación De Energía a Partir De Fuentes No Convencionales De Energía – Fnce,” UPME, Unidad de Planeación Minero Energética, Bogota, 2015.
- [22] F. A. Wobiwo *et al.*, “Recovery of fibers and biomethane from banana peduncles biomass through anaerobic digestion,” *Energy Sustain. Dev.*, vol. 37, pp. 60–65,

- 2017, doi: 10.1016/j.esd.2017.01.005.
- [23] M. V. V. Muralikrishna, T. S. A. Surya Kumari, R. Gopi, and G. Babu Loganathan, “Development of mechanical properties in banana fiber composite,” *Mater. Today Proc.*, no. xxxx, 2019, doi: 10.1016/j.matpr.2019.08.189.
- [24] A. B. Guerrero, I. Ballesteros, and M. Ballesteros, “The potential of agricultural banana waste for bioethanol production,” *Fuel*, vol. 213, pp. 176–185, 2017, doi: 10.1016/j.fuel.2017.10.105.
- [25] I. Kamdem, S. Hiligsmann, C. Vanderghem, I. Bilik, M. Paquot, and P. Thonart, “Comparative biochemical analysis during the anaerobic digestion of lignocellulosic biomass from six morphological parts of Williams Cavendish banana (Triploid Musa AAA group) plants,” *World J. Microbiol. Biotechnol.*, vol. 29, no. 12, p. 2259—2270, 2013, doi: 10.1007/s11274-013-1392-3.
- [26] I. Kamdem *et al.*, “Comparative biochemical analysis after steam pretreatment of lignocellulosic agricultural waste biomass from Williams Cavendish banana plant (Triploid Musa AAA group),” *Waste Manag. Res.*, vol. 33, no. 11, pp. 1022–1032, 2015, doi: 10.1177/0734242X15597998.
- [27] V. B. Agbor, N. Cicek, R. Sparling, A. Berlin, and D. B. Levin, “Biomass pretreatment : Fundamentals toward application,” *Biotechnol. Adv.*, vol. 29, no. 6, pp. 675–685, 2011, doi: 10.1016/j.biotechadv.2011.05.005.
- [28] J. Ruane, A. Sonnino, and A. Agostini, “Bioenergy and the potential contribution of agricultural biotechnologies in developing countries,” 2010, doi: 10.1016/j.biombioe.2010.04.011.
- [29] P. Mckendry, “Energy production from biomass (part 1): overview of biomass,” *Bioresour. Technol.*, vol. 83, no. July 2001, pp. 37–46, 2002, doi: 10.1016/S0960-8524(01)00118-3.
- [30] F. Huang, “what is biomass,” in *Materials for Biofuels*, World Scie., A. Ragauskas, Ed. Atlanta USA, 2014, pp. 1–22.
- [31] DANE, “Encuesta Nacional de Calidad de Vida ECV 2018,” 2019.
- [32] UPME, “Balance energético colombiano,” 2019.

- [33] L. Faba, E. Díaz, and S. Ordóñez, “Transformación de biomasa en biocombustibles de segunda generación,” in *Madera y Bosques*, vol. 20, no. 3, 2014, pp. 11–24.
- [34] A. Romero Salvador, “Aprovechamiento De La Biomasa Como Fuente De Energía Alternativa a Los Combustibles Fósiles,” *Cienc.Exact.Fís.Nat. (Esp)*, vol. 104, no. 2, pp. 331–345, 2010.
- [35] V. B. García, A. C. Parra, J. Ángel, and P. Ruíz, *Química de la biomasa vegetal y su efecto en el rendimiento durante la torrefacción: revisión*, Marisela C., vol. 7, no. 38. 2016.
- [36] A. Brandt, J. Gräsvik, J. P. Hallett, and T. Welton, “Deconstruction of lignocellulosic biomass with ionic liquids,” *Green Chem.*, vol. 15, no. 3, pp. 550–583, 2013, doi: 10.1039/c2gc36364j.
- [37] M. M. Meneses *et al.*, “Aprovechamiento industrial de residuos de cosecha y poscosecha del plátano en el departamento de Caldas,” *Educación en Ingeniería*, vol. 9, pp. 129–139, 2010.
- [38] K. Deivanai and R. Kasturi[^]Bai, “Batch biomethanation of banana trash and coir pith,” *Bioresour. Technol.*, vol. 52, no. 1, pp. 93–94, Jan. 1995, doi: 10.1016/0960-8524(95)00016-8.
- [39] V. . Kalia, V. Sonakya, and N. Raizada, “Anaerobic digestion of banana stem waste,” *Bioresour. Technol.*, vol. 73, no. 2, pp. 191–193, Jun. 2000, doi: 10.1016/S0960-8524(99)00172-8.
- [40] R. Toro, M. Szantó, J. Pacheco, E. Contreras, and A. Gálvez, “Guía general para la gestión de residuos sólidos domiciliarios,” Santiago de Chile, 2016.
- [41] J. Manuel Santos Calderón *et al.*, “CONSEJO NACIONAL DE POLÍTICA ECONÓMICA Y SOCIAL CONPES María Ángela Holguín Cuéllar Ministra de Relaciones Exteriores.”
- [42] Congreso de Colombia, “LEY 1715 DE 2014,” *law*, vol. 151, no. 4. pp. 1–46, 2014, doi: 10.1016/j.cell.2009.01.043.
- [43] M. Pérez, “Tratamiento de lodos residuales procedentes de plantas de tratamiento de aguas residuales mediante procesos electroquímicos para la disminución de metales pesados (Pb),” Universidad Politécnica Salesiana, 2016.

-
- [44] L. Cardoso and A. Ramírez, “Identificación de sistemas de tratamiento de lodos residuales.” p. 57, 2007.
- [45] E. Tomás-Pejó, P. Alvira, M. Ballesteros, and M. J. Negro, “Pretreatment technologies for lignocellulose-to-bioethanol conversion,” *Biofuels*, pp. 149–176, 2011, doi: 10.1016/B978-0-12-385099-7.00007-3.
- [46] “Physical Pretreatment of Biomass,” pp. 45–88, Jan. 2018, doi: 10.1016/B978-0-12-809462-4.00002-X.
- [47] P. Alvira, E. Tomás-Pejó, M. Ballesteros, and M. J. Negro, “Pretreatment technologies for an efficient bioethanol production process based on enzymatic hydrolysis: A review,” *Bioresour. Technol.*, vol. 101, no. 13, pp. 4851–4861, 2010, doi: 10.1016/j.biortech.2009.11.093.
- [48] A. Ware and N. Power, “What is the effect of mandatory pasteurisation on the biogas transformation of solid slaughterhouse wastes ?,” *Waste Manag.*, vol. 48, pp. 503–512, 2016, doi: 10.1016/j.wasman.2015.10.013.
- [49] “Corn stover for biogas production: Effect of steam explosion pretreatment on the gas yields and on the biodegradation kinetics of the primary structural compounds,” *Bioresour. Technol.*, vol. 244, pp. 949–956, Nov. 2017, doi: 10.1016/J.BIORTECH.2017.08.042.
- [50] “Steam explosion pretreatment improved the biomethanization of coffee husks,” *Bioresour. Technol.*, vol. 245, pp. 66–72, Dec. 2017, doi: 10.1016/J.BIORTECH.2017.08.110.
- [51] M. J. Negro, J. M. Martínez, J. Manero, F. Sáez, and C. Martín, *Efecto del pretratamiento con explosión por vapor en la hidrólisis enzimática de madera de eucalipto y bagazo de sorgo*. Madrid, 1990.
- [52] D. P. Chynoweth, J. M. Owens, and R. Legrand, “Renewable methane from anaerobic digestion of biomass,” *Renew. Energy*, vol. 22, no. 1–3, pp. 1–8, Jan. 2001, doi: 10.1016/S0960-1481(00)00019-7.
- [53] P. Lusk, “Methane Recovery from Animal Manures The Current Opportunities Casebook,” *Midwest Res. Inst. U.S. Dep. Energy*, no. September, p. 150, 1998.

- [54] T. Al Seadi, D. Rutz, H. Prassl, M. Köttner, T. Finsterwalder, S. Volk, R. Janssen, *Biogas Handbook*. 2008.
- [55] FAO, *Manual de biogás*, vol. 64, no. 6. Santiago de Chile, 2011.
- [56] F. N. R. E.V, “Guía sobre el Biogás Desde la producción hasta el uso,” *Bmz*, p. 249, 2010, doi: 10.1109/CISE.2010.5677158.
- [57] CiBiogas, “OPERACIONALIZAÇÃO DE BIODIGESTORES Procesos bioquímicos en la digestión anaerobia 1,” Foz Iguazu, 2018.
- [58] D. Deubelin and A. Steinhauser, *Biogas from waste and renewable resources: an introduction*, Wiley-VCH. Heidelberg, 2011.
- [59] L. Ramos, “Produccion de biogas a partir de biomasa de la microalga *Scenedesmus* sp. procedente de diferente procesos,” Universidad Politécnica de Madrid, 2014.
- [60] K. Anderson, P. Sallis, and S. Uyanik, “Anaerobic treatment processes,” in *Handbook of Water and Wastewater Microbiology*, Academic P., D. Mara and N. Horan, Eds. Londres, 2003, pp. 391–426.
- [61] G. Garcia, “Estudio de la influencia de la relación C/N en la desnitrificación y metanogénesis de agua residuales en un reactor anaeróbico de lecho fluidizado inverso,” Universidad Politécnica de Madrid, 2015.
- [62] A. Ceron-Vivas, K. T. Cáceres-Cáceres, A. Rincón-Pérez, and A. A. Cajigas, “Influence of pH and the C/N ratio on the biogas production of wastewater,” *Rev. Fac. Ing. Univ. Antioquia*, no. 92, pp. 70–79, 2019, doi: 10.17533/udea.redin.20190627.
- [63] O. Edenhofer, B. Knopf, G. Luderer, J. Steckel, and T. Bruckner, *Guide towards a sustainable energy future for the americas*. Mexico D.F., 2010.
- [64] G. F. Parkin and W. F. Owen, “Fundamentals of Anaerobic Digestion of Wastewater Sludges,” *J. Environ. Eng.*, vol. 112, no. 5, pp. 867–920, 2008, doi: 10.1061/(asce)0733-9372(1986)112:5(867).
- [65] Sun Liying, “Status and prospect of biomass energy development in China’s rural areas,” 2016.
- [66] T. Bond and M. R. Templeton, “History and future of domestic biogas plants in the developing world,” *Energy Sustain. Dev.*, vol. 15, no. 4, pp. 347–354, 2011, doi:

- 10.1016/j.esd.2011.09.003.
- [67] econoticias, “En la India las plantas de biogás son una excelente solución frente al cambio climático,” 2018. [Online]. Available: <https://www.ecoticias.com/energias-renovables/181705/India-plantas-biogas-excelente-solucion-frente-cambio-climatico>. [Accessed: 14-Aug-2019].
- [68] R. J. Patinvoh, J. V Arulappan, F. Johansson, and M. J. Taherzadeh, “Biogas digesters : from plastics and bricks to textile bioreactor — A review,” *J. Energy Environ. Sustain.*, vol. 4, pp. 31–35, 2017.
- [69] J. Stern, *The Future of Gas in Decarbonising European Energy Markets: the need for a new approach*, no. January. 2017.
- [70] Oxford, “Biogas Contribution decarbonising gas markets,” no. June 2017, 2017.
- [71] OLADE, “Tecnologías Disponibles Para Implementar Programas Rurales De Biogas En America Latina,” no. 11, .
- [72] Biogás Nicaragua, “Programa Biogás Nicaragua,” 2018. [Online]. Available: <http://programabiogasnicaragua.org>.
- [73] FOMIN (BID) and SNV, “DEL MERCADO DE BIOGAS EN NICARAGUA (ATN / ME-13067-NI Y ATN / NV-13169-NI),” 2012.
- [74] GMI, “Global Methane Initiative,” 2014. [Online]. Available: <https://www.globalmethane.org/>.
- [75] SEMARNAT, “Aprovechamiento energético de residuos urbanos (EnRes),” 2018. .
- [76] C. Serrano Camacho, “Alternativas de Utilización de Biogás en Rellenos Sanitarios en Colombia,” *Rds.Org.Co*, p. 93, 2006.
- [77] CREG, “Resolucion 240 de 2016.” 2016.
- [78] H. Llanea, M. A. Morís, L. González Azpíroz, and E. González, “Caracterización, purificación y control de biogás,” in *Estudio de viabilidad de sistemas de purificación y aprovechamiento de biogás*, probiogas PSE, 2010, pp. 1–29.
- [79] C. Cavinato, D. Bolzonella, P. Pavan, F. Fatone, and F. Cecchi, “Mesophilic and thermophilic anaerobic co-digestion of waste activated sludge and source sorted biowaste in pilot- and full-scale reactors,” *Renew. Energy*, vol. 55, pp. 260–265,

- 2013, doi: 10.1016/j.renene.2012.12.044.
- [80] G. Sailer *et al.*, “Optimizing anaerobic digestion of organic fraction of municipal solid waste (OFMSW) by using biomass ashes as additives,” *Waste Manag.*, vol. 109, pp. 136–148, 2020, doi: 10.1016/j.wasman.2020.04.047.
- [81] Z. Naji, Z. Hu, N. Sun, B. Xiao, N. Rajaa, and C. Liu, “Batch anaerobic co-digestion of OFMSW (organic fraction of municipal solid waste), TWAS (thickened waste activated sludge) and RS (rice straw): In fl uence of TWAS and RS pretreatment and mixing ratio,” *Energy*, vol. 107, pp. 131–140, 2016, doi: 10.1016/j.energy.2016.03.141.
- [82] H. I. Owamah and O. C. Izinyon, “The effect of organic loading rates (OLRs) on the performances of food wastes and maize husks anaerobic co-digestion in continuous mode,” *Sustain. Energy Technol. Assessments*, vol. 11, pp. 71–76, 2015, doi: 10.1016/j.seta.2015.06.002.
- [83] J. K. Helenas Perin, P. L. Biesdorf Borth, A. R. Torrecilhas, L. Santana da Cunha, E. K. Kuroda, and F. Fernandes, “Optimization of methane production parameters during anaerobic co-digestion of food waste and garden waste,” *J. Clean. Prod.*, vol. 272, p. 123130, 2020, doi: 10.1016/j.jclepro.2020.123130.
- [84] S. Pavi, L. E. Kramer, L. P. Gomes, and L. A. S. Miranda, “Biogas production from co-digestion of organic fraction of municipal solid waste and fruit and vegetable waste,” *Bioresour. Technol.*, vol. 228, pp. 362–367, 2017, doi: 10.1016/j.biortech.2017.01.003.
- [85] F. J. Callaghan, D. A. J. Wase, K. Thayanithy, and C. F. Forster, “Continuous co-digestion of cattle slurry with fruit and vegetable wastes and chicken manure,” *Biomass and Bioenergy*, vol. 22, no. 1, pp. 71–77, 2002, doi: 10.1016/S0961-9534(01)00057-5.
- [86] J. Grim, P. Malmros, A. Schnürer, and Å. Nordberg, “Comparison of pasteurization and integrated thermophilic sanitation at a full-scale biogas plant e Heat demand and biogas production,” *Energy*, pp. 1–9, 2014, doi: 10.1016/j.energy.2014.11.028.
- [87] S. Bhushan, M. S. Rana, Mamta, N. Nandan, and S. K. Prajapati, “Energy harnessing from banana plant wastes: A review,” *Bioresour. Technol. Reports*, vol. 7, no. April,

- 2019, doi: 10.1016/j.biteb.2019.100212.
- [88] C. Li, G. Liu, I. A. Nges, L. Deng, M. Nistor, and J. Liu, “Fresh banana pseudo-stems as a tropical lignocellulosic feedstock for methane production,” *Energy. Sustain. Soc.*, vol. 6, no. 1, 2016, doi: 10.1186/s13705-016-0093-9.
- [89] M. T. Khan, M. Brulé, C. Maurer, D. Argyropoulos, J. Müller, and H. Oechsner, “Batch anaerobic digestion of banana waste - energy potential and modelling of methane production kinetics,” *CIGR*, vol. 18, no. 1, pp. 110–128, 2016.
- [90] C. Zhang *et al.*, “Alkaline pretreatment for enhancement of biogas production from banana stem and swine manure by anaerobic codigestion,” *Bioresour. Technol.*, vol. 149, pp. 353–358, 2013, doi: 10.1016/j.biortech.2013.09.070.
- [91] I. Kamdem *et al.*, “Enhanced Biogas Production During Anaerobic Digestion of Steam-Pretreated Lignocellulosic Biomass from Williams Cavendish Banana Plants,” *Waste and Biomass Valorization*, vol. 9, no. 2, pp. 175–185, 2016, doi: 10.1007/s12649-016-9788-6.
- [92] S. Pan, Y. Chi, L. Zhou, Z. Li, L. Du, and Y. Wei, “Evaluation of squeezing pretreatment for improving methane production from fresh banana pseudo-stems,” *Waste Manag.*, vol. 102, pp. 900–908, 2020, doi: 10.1016/j.wasman.2019.12.011.
- [93] First climate, “Impuesto al Carbono en Colombia y Certificados de Reducciones de Emisiones.” First climate, 2017.
- [94] FAO, “La agricultura mundial en la perspectiva del año 2050,” Roma, 2009.
- [95] L. Hernández-Nazario, M. Benítez-Fonseca, and J. Bermúdez-Torres, “Caracterización físico-química de la fracción orgánica de residuos sólidos urbanos del vertedero controlado en el Centro Urbano Abel Santamaría de Santiago de Cuba,” *Tecnol. Química*, vol. 38, no. 2, pp. 369–379, 2018, doi: 10.1590/2224-6185.2018.2.
- [96] S. Ramos, “Biodegradabilidad anaerobia de fracción orgánica de residuo urbano pretratado mediante esterilización,” Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Minas y Energía, 2015.
- [97] Bioprocess Control Sweden AB, “AMPTS II & AMPTS II Light.” 2016.
- [98] Anaero Technology, “Operatin manual for batch fermenter range.” Cambridge,

Inglaterra.

- [99] APHA, “propiedades físicas y de agregación,” in *Métodos normalizados para el análisis de aguas potables y residuales*, 1st ed., S. A. Editorial Díaz de Santos, Ed. 1992.
- [100] NREL, “Determination of Ash in Biomass,” Colorado, 2008.
- [101] BUCHI, “Selective nitrogen determination methods related to Kjeldahl,” 2016.
- [102] U. Lossie and P. Pütz, “Control orientado de plantas de biogás con la ayuda de FOS/TAC.” HACH LANGE S.L.U.
- [103] NREL *et al.*, “NREL/TP-510-42618 analytical procedure - Determination of structural carbohydrates and lignin in Biomass,” *Food Microbiol.*, vol. 7, no. 3, pp. 1–14, 2018, doi: 10.1007/s11947-014-1349-z.
- [104] A. M. Buswell and H. F. Mueller, “Mechanism of Methane Fermentation,” *Ind. Eng. Chem.*, vol. 44, no. 3, pp. 550–552, 1952, doi: 10.1021/ie50507a033.
- [105] S. Achinas, J. Krooneman, and G. J. W. Euverink, “Enhanced Biogas Production from the Anaerobic Batch Treatment of Banana Peels,” *Engineering*, vol. 5, no. 5, pp. 970–978, 2019, doi: 10.1016/j.eng.2018.11.036.
- [106] J. L. Ramos-Suárez and N. Carreras, “Use of microalgae residues for biogas production,” *Chem. Eng. J.*, vol. 242, pp. 86–95, 2013, doi: 10.1016/j.cej.2013.12.053.
- [107] J. Pagés Díaz, I. Pereda Reyes, M. Lundin, and I. Sárvári Horváth, “Co-digestion of different waste mixtures from agro-industrial activities: Kinetic evaluation and synergetic effects,” *Bioresour. Technol.*, vol. 102, no. 23, pp. 10834–10840, 2011, doi: 10.1016/j.biortech.2011.09.031.
- [108] R. Rajagopal, D. I. Massé, and G. Singh, “A critical review on inhibition of anaerobic digestion process by excess ammonia,” *Bioresour. Technol.*, vol. 143, pp. 632–641, 2013, doi: 10.1016/j.biortech.2013.06.030.
- [109] S. S. Rao, N. Seetharama, C. V Ratnavathi, A. V Umakanth, and M. Dalal, “Second generation biofuel production from sorghum biomass,” no. February, pp. 1–5, 2010, doi: 10.13140/2.1.3563.8723.
- [110] A. B. Guerrero, I. Ballesteros, and M. Ballesteros, “Optimal conditions of acid-

- catalysed steam explosion pretreatment of banana lignocellulosic biomass for fermentable sugar production,” *J. Chem. Technol. Biotechnol.*, vol. 92, no. 9, pp. 2351–2359, 2017, doi: 10.1002/jctb.5239.
- [111] B. A. Parra Orobio *et al.*, “Influencia del pH sobre la digestión anaerobia de bio-residuos de origen municipal,” *U.D.C.A Actualidad & Divulgación Científica*, vol. 17, no. 2, 2014.
- [112] M. S. Calero Silva, “Investigación del potencial de los subproductos del proceso de obtención de etanol lignocelulósico para la producción de biogás mediante fermentación anaerobia y su análisis por cromatografía de gases,” Pontifica Universidad Católica del Ecuador, 2011.
- [113] J. Kainthola, A. S. Kalamdhad, and V. V Goud, “Optimization of process parameters for accelerated methane yield from anaerobic co-digestion of rice straw and food waste,” *Renew. Energy*, vol. 149, pp. 1352–1359, 2020, doi: 10.1016/j.renene.2019.10.124.
- [114] S. Fu, F. Wang, X. Shi, and R. Guo, “Impacts of microaeration on the anaerobic digestion of corn straw and the microbial community structure,” *Chem. Eng. J.*, vol. 287, pp. 523–528, 2016, doi: 10.1016/j.cej.2015.11.070.
- [115] V. Kumar, L. A. Fdez-güelfo, Y. Zhou, C. J. Álvarez-gallego, and L. I. R. Garcia, “Anaerobic co-digestion of organic fraction of municipal solid waste (OFMSW): Progress and challenges,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 93, no. 2017, pp. 380–399, 2018, doi: 10.1016/j.rser.2018.05.051.
- [116] T. Hou, J. Zhao, Z. Lei, K. Shimizu, and Z. Zhang, “Synergistic effects of rice straw and rice bran on enhanced methane production and process stability of anaerobic digestion of food waste,” *Bioresour. Technol.*, vol. 314, no. July, p. 123775, 2020, doi: 10.1016/j.biortech.2020.123775.
- [117] X. Wang, X. Lu, F. Li, and G. Yang, “Effects of temperature and Carbon-Nitrogen (C/N) ratio on the performance of anaerobic co-digestion of dairy manure, chicken manure and rice straw: Focusing on ammonia inhibition,” *PLoS One*, vol. 9, no. 5, pp. 1–7, 2014, doi: 10.1371/journal.pone.0097265.

- [118] B. Shamurad, N. Gray, E. Petropoulos, S. Tabraiz, E. Membere, and P. Sallis, “Predicting the effects of integrating mineral wastes in anaerobic digestion of OFMSW using first-order and Gompertz models from biomethane potential assays,” *Renew. Energy*, vol. 152, pp. 308–319, 2020, doi: 10.1016/j.renene.2020.01.067.
- [119] M. A. De la Rubia, J. A. Villamil, J. J. Rodriguez, R. Borja, and A. F. Mohedano, “Mesophilic anaerobic co-digestion of the organic fraction of municipal solid waste with the liquid fraction from hydrothermal carbonization of sewage sludge,” *Waste Manag.*, vol. 76, pp. 315–322, 2018, doi: 10.1016/j.wasman.2018.02.046.
- [120] A. Nielfa, R. Cano, M. Vinot, E. Fernández, and M. Fdz-Polanco, “Anaerobic digestion modeling of the main components of organic fraction of municipal solid waste,” *Process Saf. Environ. Prot.*, vol. 94, no. C, pp. 180–187, 2015, doi: 10.1016/j.psep.2015.02.002.
- [121] A. Żarczyński, K. Rosiak, P. Anielak, and W. Wolf, *Practical methods of cleaning biogas from hydrogen sulphide. Part 1, Application of solid sorbents*, vol. no. 12. 2014.
- [122] S. H. Duque, C. A. Cardona, and J. Moncada, “Techno-economic and environmental analysis of ethanol production from 10 agroindustrial residues in Colombia,” *Energy and Fuels*, vol. 29, no. 2, pp. 775–783, 2015, doi: 10.1021/ef5019274.
- [123] A. Arrieta *et al.*, “Consultoría técnica para el fortalecimiento y mejora de la base de datos de factores de emisión de los combustibles colombianos -FECOC.” UPME, Unidad de Planeación Minero Energética, Medellin, pp. 1–52, 2016.
- [124] UPME, “Balance de Gas Natural en Colombia 2015 - 2023,” no. 69, pp. 1–29, 2015.
- [125] D. Kumari and R. Singh, “Pretreatment of lignocellulosic wastes for biofuel production: A critical review,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 90, no. March, pp. 877–891, 2018, doi: 10.1016/j.rser.2018.03.111.
- [126] M. J. Taherzadeh and K. Karimi, “Pretreatment of lignocellulosic wastes to improve ethanol and biogas production: A review,” *Int. J. Mol. Sci.*, vol. 9, no. 9, pp. 1621–1651, 2008, doi: 10.3390/ijms9091621.
- [127] C. Morales-Polo, M. del Mar Cledera-Castro, and B. Yolanda Moratilla Soria, “Reviewing the anaerobic digestion of food waste: From waste generation and

- anaerobic process to its perspectives,” *Appl. Sci.*, vol. 8, no. 10, 2018, doi: 10.3390/app8101804.
- [128] N. Cordeiro, M. N. Belgacem, I. C. Torres, and J. C. V. P. Moura, “Chemical composition and pulping of banana pseudo-stems,” *Ind. Crops Prod.*, vol. 19, pp. 147–154, 2004, doi: 10.1016/j.indcrop.2003.09.001.
- [129] M. Ballesteros, J. M. Oliva, M. J. Negro, P. Manzanares, and I. Ballesteros, “Ethanol from lignocellulosic materials by a simultaneous saccharification and fermentation process (SFS) with *Kluyveromyces marxianus* CECT 10875,” *Process Biochem.*, vol. 39, no. 12, pp. 1843–1848, Oct. 2004, doi: 10.1016/j.procbio.2003.09.011.
- [130] Verein Deutscher Ingenieure (VDI), “Vdi 4630 2006,” no. November, p. 92, 2006, doi: 2006.
- [131] M. J. Negro, J. M. Martínez, J. Manero, F. Sáez, and C. Martín, “Efecto del pretratamiento con explosión por vapor en la hidrólisis enzimática de madera de eucalipto y bagazo de sorgo.” CIEMAT, Madrid, p. 40, 1990.
- [132] M. J. Odedina, B. Charnnok, K. Saritpongteeraka, and S. Chaiprapat, “Effects of size and thermophilic pre-hydrolysis of banana peel during anaerobic digestion, and biomethanation potential of key tropical fruit wastes,” 2017, doi: 10.1016/j.wasman.2017.07.003.
- [133] M. Hjorth, K. Gränitz, A. P. S. Adamsen, and H. B. Møller, “Extrusion as a pretreatment to increase biogas production,” *Bioresour. Technol.*, vol. 102, no. 8, pp. 4989–4994, 2011, doi: 10.1016/j.biortech.2010.11.128.
- [134] A. B. Guerrero, “ASSESSMENT OF DIFFERENT PATHWAYS FOR THE CONVERSION OF BANANA AGRICULTURAL WASTES TO BIOENERGY,” Universidad Politécnica de Madrid, 2017.
- [135] O. A. Arbeláez Pérez, “Informe mensual de la prestación de servicio de energía eléctrica en las localidades sin telemetría de las ZNI,” 2020.
- [136] SSPD, “ZONAS NO INTERCONECTADAS - ZNI Diagnóstico de la prestación del servicio de energía eléctrica 2017 Superintendencia Delegada para Energía y Gas Combustible,” 2017.

- [137] Ministerio de Minas y Energía, “Cobertura del servicio de gas natural,” Bogotá, 2020.
- [138] UPME, “Implementación del Plan de Abastecimiento de Gas Natural.” Cartagena de Indias, p. 26, 2018.
- [139] IPCC and SRCCL, “Special Report on Climate Change and Land: Chapter 4: Land Degradation,” 2019.
- [140] Consorcio estrategia rural sostenible, Unidad de planeación minero energética UPME, and Ministerio de Minas y Energía, “Realizar un estudio que permita formular un programa actualizado de sustitución progresiva de leña como energético en el sector residencial en Colombia, con los componentes necesarios para su ejecución,” Bogotá, 2019.
- [141] DANE, “Boletín Técnico Encuesta Nacional Agropecuaria (ENA),” Bogotá, 2020.
- [142] EPM, “Uso inteligente de la energía eléctrica Banco de recomendaciones,” 2012.
- [143] ICA, “RESOLUCIÓN No. 068370 (27/05/2020),” vol. 068370, no. 068370. Instituto Colombiano Agropecuario, pp. 1–37, 2020.
- [144] E. Ponce, “Métodos sencillos en obtención de biogás rural y su conversión en electricidad,” *Idesia*, vol. 34, no. 5, pp. 75–79, 2016, doi: 10.4067/S0718-34292016005000011.
- [145] J. Kim, S. M. Sen, and C. T. Maravelias, “An Optimization-Based Assessment Framework for Biomass-to-Fuels Conversion Strategies Electronic Supplementary Information,” *Energy Environ. Sci.*, vol. 6, pp. 1–20, 2013, doi: 10.1039/c3ee24243a.
- [146] M. S. Peters, K. D. Timmerhaus, and R. E. West, *Plant Design and Economics for Chemical Engineers*, McGraw-Hill. New York: Elizabeth A. Jones, 1980.
- [147] ENERCA, “Tarifas Usuarios Regulados,” 2020.
- [148] L. E. Rincón, “BIOGAS INDUSTRIAL User manual Bioenergy and food security Rapid appraisal (BEFS RA).” FAO, Roma, 2017.
- [149] D. E. Garrett, *CHEMICAL ENGINEERING ECONOMICS*. .
- [150] T. R. Preston, “Elabore su propio biodigestor de bajo costo,” 2005.
- [151] Karina Guallasamin Constante and Débora Simón-Baile, “Huella de carbono del cultivo de rosas en Ecuador comparando dos metodologías: GHG Protocol vs. PAS 2050/ Carbon footprint of the cultivation of roses in Ecuador comparing two

methodologies: GHG Protocol vs. PAS 2050 |,” *Letras Verdes. Revista Latinoamericana*, 2018.

[152] M. de Ambiente, “PRINCIPALES PREGUNTAS FRENTE AL IMPUESTO NACIONAL AL CARBONO Y LA SOLICITUD DE NO CAUSACIÓN POR CARBONO NEUTRALIDAD.” doi: 10.1017/CBO9781107415324.004.

[153] S. Perry, R. H. Perry, D. W. Green, and J. O. Maloney, *CHEMICAL ENGINEERS ’ HANDBOOK SEVENTH*. 1997.