

Información Importante

La Universidad Santo Tomás, informa que el(los) autor(es) ha(n) autorizado a usuarios internos y externos de la institución a consultar el contenido de este documento a través del Catálogo en línea del CRAI-Biblioteca y el Repositorio Institucional en la página Web de la CRAI-Biblioteca, así como en las redes de información del país y del exterior con las cuales tenga convenio la Universidad.

Se permite la consulta a los usuarios interesados en el contenido de este documento, para todos los usos que tengan **finalidad académica**, nunca para usos comerciales, siempre y cuando mediante la correspondiente cita bibliográfica se le dé crédito al trabajo de grado y a su autor.

De conformidad con lo establecido en el Artículo 30 de la Ley 23 de 1982 y el artículo 11 de la Decisión Andina 351 de 1993, la Universidad Santo Tomás informa que “los derechos morales sobre documento son propiedad de los autores, los cuales son irrenunciables, imprescriptibles, inembargables e inalienables.”

**Centro de Recursos para el Aprendizaje y la Investigación, CRAI-Biblioteca
Universidad Santo Tomás, Bucaramanga**

**EVALUACIÓN DEL POTENCIAL DE HIDRÓGENO A PARTIR DE BIOMASA
RESIDUAL PRESENTE EN SANTANDER MEDIANTE PROCESOS DE
CODIGESTIÓN ANAEROBIA – ESTUDIO DE CASO**

**DIANA YAMILE PARADA PARADA
BIÓLOGA**

**UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS
DIVISIÓN DE INGENIERÍAS Y ARQUITECTURA
FACULTAD DE QUÍMICA AMBIENTAL
BUCARAMANGA
2017**

**EVALUACIÓN DEL POTENCIAL DE HIDRÓGENO A PARTIR DE BIOMASA
RESIDUAL PRESENTE EN SANTANDER MEDIANTE PROCESOS DE
CODIGESTIÓN ANAEROBIA – ESTUDIO DE CASO**

**DIANA YAMILE PARADA PARADA
BIÓLOGA**

**Trabajo de grado para optar el título de Magister en Ciencias y Tecnologías
Ambientales**

**Director
Angélica María Candela Soto
Qca., MSc., Ph.D en Ciencias**

**Co-director
Mario Andrés Hernández Pardo
Ing. Qco., MSc., Ph.D en Ingeniería Energía y Ambiente**

**UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS
DIVISIÓN DE INGENIERÍAS Y ARQUITECTURA
FACULTAD DE QUÍMICA AMBIENTAL
BUCARAMANGA
2017**

Agradecimientos

A mi Dios que todo lo hace posible, mi esposo e hijos por su apoyo y paciencia para la dedicación del tiempo en la realización de la maestría.

A mis directores de proyecto, Doctora Angélica Candela y Doctor Mario Hernández, por su apoyo y persistencia.

A la doctora Martha Cervantes y a Cesar Acevedo por sus tutorías y recomendaciones en la elaboración de este trabajo.

A la Universidad Santo Tomas por la prestación de los recursos para la elaboración del presente estudio, adscrito al proyecto de la IX convocatoria interna titulado estudio del potencial de la producción de hidrógeno a partir de la mezcla de estiércol bovino y mucilago de café por vía fermentativa código GIFQCAAMP22016.

Diana Parada

CONTENIDO

Pág.

INTRODUCCIÓN	14
1. DEFINICIÓN DEL PROBLEMA	17
2. JUSTIFICACIÓN	19
3. OBJETIVOS	21
3.1 Objetivo General	21
3.2 Objetivos Específicos	21
4. MARCO REFERENCIAL	22
4.1 ANTECEDENTES	22
4.2 MARCO CONCEPTUAL	25
5. DISEÑO METODOLÓGICO	36
5.1 VIGILANCIA TECNOLÓGICA	36
5.2 SELECCIÓN DE SUSTRATOS	39
5.3 POTENCIAL DE HIDRÓGENO	40
6. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	42
6.1 VIGILANCIA TECNOLÓGICA	42
6.2 BIOMASA RESIDUAL CON CARACTERÍSTICAS ADECUADAS PARA LA PRODUCCIÓN DE HIDRÓGENO	53
6.3 BIOMASA RESIDUAL EN SANTANDER	55
6.4 EVALUACIÓN DEL POTENCIAL TEÓRICO PARA LA PRODUCCIÓN DE BIOHIDRÓGENO	60
7. CONCLUSIONES	76
8. RECOMENDACIONES	78
BIBLIOGRAFÍA	79
ANEXOS	90

LISTA DE CUADROS

	Pág.
Cuadro 1. Clasificación de la biomasa de acuerdo a su procedencia.	33
Cuadro 2. Fuentes Generadoras de Biomasa	33
Cuadro 3. Procesos de transformación de la biomasa de acuerdo a su humedad	34
Cuadro 4. Composición química de diferentes formas de biomasa	35
Cuadro 5. Indicadores cienciométricos para artículos y patentes.	38
Cuadro 6. Potencial de biohidrógeno de diferentes biomasas residuales en diversas condiciones de operación	61
Cuadro 7. Potencial para la biomasa seleccionada de Santander.	64

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Composición de algunos materiales orgánicos	55
Tabla 2. Producción de cultivos agrícolas en Santander	56
Tabla 3. Producción pecuaria en Santander	56
Tabla 4. Cantidad de biomasa residual generada para cada residuo por tonelada de cultivo.....	57
Tabla 5. Composición de biomasa de cultivos seleccionados de Santander	59
Tabla 6. Rendimiento teórico de hidrógeno a partir de celulosa	66
Tabla 7. Rendimiento teórico de hidrógeno a partir de hemicelulosa por tonelada de residuo.	68
Tabla 8. Potencial de hidrógeno para la biomasa de Santander vía ácido acético año.....	70

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Esquema de reacciones de digestión anaerobia	29
Figura 2. Diagrama de flujo del proceso hidrogenogénico y metanogénico.....	31
Figura 3. Metodología	36
Figura 4. Proceso metodológico de la vigilancia tecnológica ⁸⁶	37
Figura 5. Metodología para la selección de sustrato.....	40
Figura 6. Metodología potencial de hidrógeno	40
Figura 7. Dinámica de publicación en el periodo 2000 - 2016	42
Figura 8. Dinámica de publicaciones por países.....	43
Figura 9. Distribución de publicaciones en países latinoamericanos	44
Figura 10. Dinámica de publicaciones por instituciones	45
Figura 11. Dinámica de publicaciones por instituciones en Latinoamérica	47
Figura 12. Dinámica de autores	48
Figura 13. Matriz Trabajo Colaborativo	50
Figura 14. Matriz Palabras clave.....	51
Figura 15. Cultivos permanentes en Santander-Distribución en áreas sembradas	56
Figura 16. Composición de biomasa de cultivos seleccionados	59
Figura 17. Rendimiento total de hidrógeno a partir de la biomasa residual seleccionada vía ácido acético por tonelada de residuo.....	69

LISTA DE ANEXOS

Pág.

Anexo 1. Cálculos estequiométricos para la estimación de la producción teórica del hidrógeno a partir de celulosa ruta ácido acético.....	90
Anexo 2. Cálculos estequiométricos para la estimación de la producción teórica del hidrógeno a partir de celulosa ruta ácido butírico	93
Anexo 3. Cálculos estequiométricos para la estimación de la producción teórica del hidrógeno a partir de hemicelulosa ruta ácido acético	96
Anexo 4. Cálculos estequiométricos para la estimación de la producción teórica del hidrógeno a partir de hemicelulosa ruta ácido butírico.....	99

LISTA DE ABREVIATURAS

BSR: eliminación biológica de sulfatos

CM: mucilago de café

CO₂: dióxido de carbono

DANE: Departamento Administrativo Nacional de Estadística

DBO: demanda biológica de oxígeno

DQO: demanda química de oxígeno

EPPA: efluente de palma de aceite

FORSU: fracción orgánica de los residuos sólidos urbanos

g: gramos

GEDC: Centro de Desarrollo de Energía Verde

HR: humedad relativa

IRCRE: Centro de Investigación Internacional para la Energía Renovable

K: kelvin

kcal: kilocalorías

kg: kilogramos

kj: kilo julios

MBF: floculantes microbianas compuestos

Mpa: mega pascal

Mtep: millones de tonelada equivalente de petróleo

Na: sodio

NL: litros normales

pH: potencial de hidrógeno

POME: efluente del molino de aceite de palma

REF: referencias

RSU: residuos sólidos urbanos

TS: solidos totales

VFA: ácidos grasos volátiles

VS: solidos volátiles

GLOSARIO

AERÓBICO: proceso que tiene lugar en presencia de oxígeno disuelto. (Microorganismos que usan O_2 en su proceso de respiración)¹.

ANAERÓBICO: proceso que tiene lugar en ausencia de oxígeno disuelto. (Microorganismo que solamente crecen y metabolizan en ausencia de oxígeno molecular)².

BACTERIAS: microorganismos unicelulares procariotas, de metabolismo aeróbico y anaeróbico³.

BIODEGRADABLE: material de residuo que puede ser fácilmente descompuesto en el ambiente por la acción de seres vivos².

BIOHIDRÓGENO: es un vector energético que puede ser obtenido a partir de variadas fuentes de energía primaria (petróleo, solar, eólica, biomasa, etc.), permitiendo por medio de pilas de combustible, la generación de energía eléctrica como una energía renovable no convencional con una elevada eficiencia.

BIOMASA: materia orgánica de origen vegetal o animal, incluyendo los residuos y desechos orgánicos, susceptible de ser aprovechada energéticamente⁴.

BIORREACTOR: sistema que mantiene un ambiente biológicamente activo. En algunos casos, un biorreactor es un recipiente en el que se lleva a cabo un proceso químico que involucra organismos o sustancias bioquímicamente activas derivadas de dichos organismos. Este proceso puede ser aeróbico o anaeróbico¹.

CODIGESTIÓN: digestión de una mezcla de sustratos con características complementarias realizada a propósito para aumentar la producción de biogás².

DEGRADACIÓN: transformación de sustancias complejas en sustancias simples³.

DIGESTIÓN ANAERÓBICA: descomposición de material biodegradable en ausencia de oxígeno para dar como resultado dos productos principales: biogás y el lodo estabilizado, conocido como digerido².

ECOSISTEMA: sistema que integra la comunidad biótica y el ambiente abiótico, que interactúan de tal forma que el intercambio entre materias vivas y no vivas sigue una vía circular⁴.

ENERGÍA: es fuerza de acción o fuerza de trabajo, se refiere a un recurso natural (incluyendo a su tecnología asociada) para extraerla, transformarla y darle un uso industrial o económico. Existen dos tipos de energías, las energías renovables,

como la energía eólica, la energía hidráulica, la energía solar, y las no renovables, como el carbón, el gas natural, el petróleo, la energía atómica ⁴.

ENZIMA: proteína catalizadora producida en el interior de un organismo vivo que acelera reacciones químicas específicas ³.

FERMENTACIÓN: es un proceso de tipo catabólico de oxidación que tiene lugar de forma incompleta, totalmente anaeróbico, dando como producto final un compuesto de tipo orgánico ².

INOCULO: conjunto de microorganismos que son transferidos a un huésped mediante la inoculación para reducir o aumentar su inmunidad frente a determinada enfermedad o proceso. Puede ser una toxina, un virus o una bacteria, muertos o atenuado, o un suero inmune ².

IMPACTO AMBIENTAL: alteración o cambio del medio ambiente que se da como resultado directo o indirecto de actividades humanas ⁴.

METABOLISMO: transformaciones físicas y químicas que permiten la utilización de la materia y energía por parte de un organismo ³.

MICROORGANISMO O MICROBIO: ser vivo de tamaño microscópico, incluyendo archaeas, bacterias, virus, levaduras, algunos hongos, protozoos y algunas algas ³.

NUTRIENTE: sustancia disuelta que es requerida por los organismos para su metabolismo ³.

SUSTRATO: molécula sobre la cual actúa una enzima. Dicho de otra forma, las enzimas se encargan de catalizar las reacciones químicas que involucran a un sustrato. La unión entre la enzima y el sustrato forma un complejo ³.

RESIDUOS: describe al material que pierde utilidad tras haber cumplido con su misión o servido para realizar un determinado trabajo ⁴.

RESUMEN

Actualmente la producción de energías alternativas están tomando gran importancia a nivel mundial debido a que la mayor fuente energética se produce a partir de reservas fósiles, las cuales a su vez se están agotando y su uso produce contaminación, generando impactos negativos como el efecto invernadero y el calentamiento global. El hidrógeno es considerado actualmente una alternativa viable para sustituir parte de la demanda energética, este posee amplias características dentro de las que se destacan principalmente que su combustión es libre de emisiones contaminantes y su potencial energético es mayor que los combustibles fósiles utilizados convencionalmente; pero la investigación en la obtención de este a partir de biomasa no reportan resultados concluyentes en cuanto a factores de producción y nivel máximo de rendimiento.

En este sentido este proyecto muestra el estudio y análisis de las investigaciones realizadas en un periodo desde el 2000 al 2016 sobre la evaluación del potencial de biohidrógeno por medio de la codigestión anaeróbica en la base de datos de scopus.

Para el análisis del estudio bibliométrico realizado se muestra la dinámica creciente en el interés por la investigación de la producción de hidrógeno a nivel mundial siendo el 2015 el año en que mayor interés se refleja según publicaciones registradas. Es importante resaltar que se ha integrado un trabajo entre los diferentes países e instituciones por el interés del uso de energías alternativas no convencionales y del desarrollo de tecnologías limpias para la producción de hidrógeno a partir de residuos de material orgánico generadores de problemas de contaminación ambiental y foco de problemáticas para la salud pública debido a su mala disposición, los países que mayor reporta interés y estudios en la temática a nivel internacional China y a nivel latinoamericano Brasil, presentando también una dinámica de colaboración entre países.

Se efectuó un estudio de biomasa residual proveniente de cultivos de Santander como una alternativa de solución a problemas ambientales mediante el uso sostenible de esta para la producción de hidrógeno como un biocombustible amigable con el medio ambiente, la biomasa seleccionada hace parte de las actividades económicas permanentes y abundantes de la región, por ejemplo para cultivos como la palma de aceite la producción es de 1229,63 toneladas por hectárea al año y el sector avícola registra 38673 cabezas al año; del sector agrícola (bagazo de caña de azúcar, mucilago de café, bagazo de palma de aceite, mucilago de cacao) y del sector pecuario (porcinaza, caprinaza, bovinaza, gallinaza), estos residuos son energéticamente muy importantes debido a que se producen en grandes cantidades y son altamente biodegradables, poseen características fisicoquímicas apropiadas para la obtención de hidrógeno bajo criterios de investigación citados, materia rica en nutrientes y material orgánico con una alta composición lignocelulósica y porcentaje de humedad mayores al 50%, los valores

de rendimiento teórico obtenidos son apreciables y demuestran las potencialidades energéticas proveniente de estos cultivos para el estudio de una posible aplicación en la región.

Dentro de las tecnologías biológicas para la obtención de hidrógeno se encuentra el proceso de codigestión anaeróbica de diferentes sustratos en ausencia de oxígeno, esta tecnología se ha convertido en un método económicamente viable y de alto rendimiento, teniendo en cuenta los factores de producción de hidrógeno el mayor potencial de rendimiento teórico y energético obtenido con diferentes tipos de biomasa son los obtenidos a partir de sustratos ricos en nutrientes, humedad y carbohidratos, operados bajo condiciones específicas para el reactor tipo batch mediante codigestión, el uso de esta práctica requiere control directo y periódico de variables y parámetros como temperatura, pH, tiempo de reacción, concentración de sustratos e inóculos, según estos datos se evaluó el rendimiento de las mezclas de sustratos de la biomasa residual seleccionada de Santander que podrían incrementar el rendimiento en la producción de hidrógeno.

INTRODUCCIÓN

Actualmente la gran parte de la energía proviene de fuentes no renovables; desde los años setenta, el consumo de energía mundial ha aumentado considerablemente, llegando a un consumo de 12.274,6 Mtep de energía primaria total para el 2011 ⁵.

La demanda energética se basa en el uso de combustibles fósiles como el carbón, petróleo y gas natural. Esta dependencia tiene implicaciones económicas como la producción centralizada en determinadas zonas del mundo lo que resulta en precios elevados, aunque los recursos energéticos son abundantes, las reservas de energías primarias son escasas, variables y están repartidas de forma desigual por todo el planeta ⁶. Por ejemplo las reservas probadas de petróleo y el gran consumo actual registrado en los últimos años, indican que de aquí a cuarenta y cinco años ya no resultará rentable extraer este recurso ⁵. En cuanto a las implicaciones ambientales la combustión de combustibles fósiles constituye el principal causante de la emisión de gases de efecto invernadero responsable del calentamiento global ⁷.

Las implicaciones tanto económicas como ambientales han generado en los últimos años interés en el desarrollo de nuevas fuentes de energía, por ejemplo, el hidrógeno, que se consideran un vector energético, puede convertirse en un importante combustible puesto que es un recurso renovable y se encuentra en muchos compuestos como el agua, combustibles fósiles y biomasa de los cuales puede ser obtenido ⁸.

La biomasa se presenta como una posible solución al gasto energético y a los problemas ambientales generados por otras fuentes energéticas ⁹. Se estima que el consumo de biomasa representa el 10, 6% del consumo mundial total de energía primaria ⁵. Además se destaca que las emisiones por la combustión de la biomasa son neutras debido a que el dióxido de carbono que los cultivos tomaron en su crecimiento regresa a la atmosfera para un balance cero. Por estos motivos planteados la biomasa es considerada como una alternativa no solo energética sino ambientalmente sostenible y amigable ¹⁰.

En Colombia estos tipo de fuentes energéticas son denominadas fuentes energéticas no convencionales según la ley 697 de 2001 ¹¹; estas se encuentran disponibles pero son empleadas de manera marginal o no se comercializan ampliamente¹². La biomasa abarca un conjunto de materias orgánicas que se caracterizan por su heterogeneidad, por su origen y por su naturaleza. Los recursos biomásicos pueden agruparse en agrícolas y forestales, materia orgánica de las aguas residuales y los lodos de depuradora, fracción orgánica de los residuos sólidos urbanos (FORSU), y otros residuos derivados de las industrias ¹³.

En cuanto al contexto energético, la biomasa es considerada como la materia orgánica originada en un proceso biológico, espontáneo o provocado, utilizable como fuente de energía. La valoración de la biomasa puede hacerse a través procesos básicos mediante los que puede transformarse en calor y electricidad. Estos procesos pueden ser la combustión, digestión anaerobia, gasificación y pirolisis por medio de las cuales se pueden obtener gases con alto poder calorífico, biocombustibles como el etanol entre otras fuentes energéticas ¹⁰.

Mediante los procesos de digestión, combustión o descomposición natural la biomasa convierte la energía química en energía calórica. La biomasa contiene carbono, azufre, oxígeno y compuestos volátiles formados por cadenas largas de tipo C_nH_m , todos ellos responsables de su alto poder calorífico que oscila entre 3000 y 3500 kcal/kg para los residuos lignocelulósicos ¹⁴.

La selección del tipo de aprovechamiento energético depende de las propiedades fisicoquímicas, bioquímicas y energéticas del residuo; para la biomasa seca es necesario reconocer parámetros como la humedad, proporciones de carbonos fijos y volátiles, valor calorífico, metales alcalinos y contenido de cenizas; y para la biomasa húmeda la humedad y la relación de celulosa y lignina ¹⁵.

Colombia por su posición geográfica cuenta con variedad de climas que favorecen el crecimiento de diversidad de especies vegetales, muchos de los cultivos agrícolas hoy en días ya son utilizados para la producción de biocombustibles como la caña de azúcar y la palma de aceite ¹⁶. A nivel mundial países como China, Estados Unidos, Canadá, Taiwán, Japón entre otros han realizado estudios para evaluar la biomasa residual vegetal, agrícola, de estiércol animal y de los residuos sólidos urbanos como fuentes de energía alternativas como el biohidrógeno.

El hidrógeno representa alrededor del 6% de la biomasa seca. Para obtener hidrógeno a partir de la biomasa se han utilizado técnicas dentro de las que se destacan la digestión anaeróbica; como productos finales del desarrollo de este proceso se obtienen una mezcla gaseosa conocida como biogás la cual está compuesta principalmente por gases como metano (CH_4), dióxido de carbono (CO_2) y el biohidrógeno (H_2), además el fango efluente digerido el cual presenta gran cantidad de nutrientes propicios para la fertilización de terrenos cultivables ⁹.

La digestión anaeróbica es un proceso sostenible que permite establecer una solución concreta a la problemática del manejo de los residuos orgánicos biodegradables y la generación de energía a partir de la generación de biogás mitigando los efectos negativos en el medio ambiente. Por tal motivo esta investigación tiene como objetivo evaluar el potencial teórico de producción de hidrógeno generado a partir de la biomasa residual del departamento de Santander-Colombia por vía fermentativa. El análisis del estudio bibliométrico se realizó mediante vigilancia tecnológica utilizando bases de datos especializadas y se evaluaron las investigaciones, el impacto y la tendencia creciente a nivel mundial,

acerca del interés por el aprovechamiento de los recursos para la producción del potencial de biohidrógeno generado durante la digestión anaeróbica de biomasa residual.

1. DEFINICIÓN DEL PROBLEMA

Actualmente la degradación del medio ambiente y la crisis energética son dos temas trascendentales para el desarrollo sostenible del mundo. Según La Organización Mundial de la Salud la contaminación del aire por el aumento en los niveles de CO₂ han influido en el efecto invernadero y el calentamiento global ¹⁷⁻¹⁹, generadas como subproductos de actividades humanas, por un uso ineficiente de combustibles fósiles y de la biomasa ²⁰.

La biomasa residual se ha convertido en una problemática ambiental debido a la falta de tratamientos adecuados, a su inadecuada disposición y a su abundancia ²¹. En Colombia, por ejemplo el sector pecuario cuenta con el 76% del área total destinada a actividades agropecuarias representado un 40% ganadería bovina, 40% avícola, 10% porcícola y 10% actividades restantes, generando gran cantidad de biomasa residual que puede afectar tanto a las masas de agua, suelo y aire de diferentes maneras ¹³.

Residuos provenientes de actividades agropecuarias como el componente de las excretas que por escorrentías llega a medios acuáticos alterará el equilibrio debido a que necesitan oxígeno para su descomposición. La demanda de oxígeno superior a los niveles existentes produce una serie de efectos no deseados en el ecosistema ²²; por ejemplo en el caso de los suelos cuando el vertido de residuos se realiza en forma indiscriminada y continuada, representa una problemática, dado que la fracción sólida del estiércol ocasiona un taponamiento en los poros del suelo por colmatación, disminuyendo la capacidad de drenaje del terreno ^{23,24}. Posteriormente comienza una acción química en donde se presenta una degradación estructural del suelo, básicamente por acción del sodio (Na); finalmente y como consecuencia de la acumulación progresiva de los residuos, se genera una acción biológica consistente en el desarrollo de microorganismos potencialmente patógenos para los animales y el hombre ²⁴.

No solo la industria agropecuaria genera biomasa residual que influye negativamente en los ecosistemas, la industria lechera, levadura de cervecería, cultivos agrícolas generan desechos y aguas residuales donde se hallan algunos hidratos de carbono, estos excesivos niveles de nutrientes en el suelo y el agua se han convertido en uno de los más importantes problemas que producen cambios directos de la alteración de ecosistemas terrestres, de agua dulce y marinos ²⁵.

La excesiva carga de nutrientes en sistemas de agua dulce o en sistemas marinos costeros puede conducir a un crecimiento excesivo de plantas y algas (proceso conocido como eutrofización) y a otros cambios que pueden reducir o eliminar las poblaciones de peces, aumentar la aparición de microbios. Otros efectos de la carga de nutrientes son la contaminación del aire, la emisión de gases de efecto invernadero y la reducción de la capa de ozono.

Teniendo en cuenta esta problemática y que la gran demanda actual de energía depende primordialmente de las pocas reservas de combustibles fósiles, una de las soluciones es el aprovechamiento de algunos residuos orgánicos los cuales son abundantes, localmente disponibles, de alta carga orgánica y altamente biodegradables.

Los desechos generados por la industria agrícola, porcícola y alimentaria contienen almidón y/o celulosa compuestos ricos en hidratos de carbono, están compuestos por azúcares simples tales como glucosa, sacarosa y lactosa son sustratos fácilmente biodegradables y eficientes para la producción de hidrógeno ²⁶. El almidón puede ser hidrolizado a la glucosa y la maltosa por hidrólisis ácida o enzimática seguida de conversión de carbohidratos a ácidos orgánicos y luego a gas hidrógeno. La celulosa y la hemicelulosa que contiene los desechos agrícolas se pueden hidrolizar a los carbohidratos que se procesan adicionalmente para el ácido orgánico y la producción de gas hidrógeno ²⁷.

El lodo, residuo generado en las plantas de tratamiento de aguas residuales también es considerado un generador de energía como metano y biohidrógeno debido a que contiene grandes cantidades de hidratos de carbono y proteínas ²⁵.

Gracias a la composición de estos residuos se permite el desarrollo de tecnologías para la producción de hidrógeno mediante codigestión ²⁸, este biocombustible posee un alto contenido energético, por unidad de peso, 122-142 kJ/g, con un poder calorífico superior al de otros hidrocarburos ²⁹, es respetable con el medio ambiente, es un combustible limpio y libre de carbono, y puede dar credenciales sociales, económicos, medioambientales y hace parte de reactivos para procesos químicos e industriales ³⁰.

La producción de hidrógeno a partir de la utilización de materiales de desecho se convierte en un enfoque prometedor para satisfacer las necesidades de energía y como alternativa al uso sostenible de los residuos. Los criterios principales para la selección de los materiales de desecho dependen de la disponibilidad, el costo, el contenido de carbohidratos y la facilidad de biodegradabilidad ³¹.

Sin embargo, la producción de hidrógeno de manera directa a partir de biomasa es limitada, razón por la cual se requiere el uso de sustratos ricos en carbono. En este sentido, este trabajo se enfocó en la evaluación del potencial de hidrógeno a partir de sustratos orgánicos de diferentes fuentes y plantear una posible aplicación en escenarios generadores de biomasa residual en Santander mediante vigilancia tecnológica.

Pregunta de investigación

¿Cuál es el potencial teórico de producción de hidrógeno de la biomasa residual generada en el sector agroindustrial de Santander mediante procesos de codigestión anaerobia?

2. JUSTIFICACIÓN

Actualmente la creciente demanda de energía, la degradación del medio ambiente por las emisiones atmosféricas, consumo rápido de reservas de combustibles fósiles no renovables y combustibles basados en hidrocarburos, temas trascendentales para el desarrollo sostenible en el mundo, han llevado a la búsqueda de tecnologías para producción de energías alternativas respetuosas con el medio ambiente como posibles sustitutos de las fuentes de energía que afectan drásticamente al entorno natural ³²

El hidrógeno es una materia prima ampliamente utilizada actualmente para la producción de químicos, hidrogenación de grasas y aceites en la industria alimentaria, la producción de dispositivos electrónicos, procesamiento de acero y también para la desulfuración y reformulación de la gasolina en las refinerías ³³. A diferencia de los combustibles como el gas natural y el petróleo, el hidrógeno tiene que generarse, por lo que no es un combustible sino un vector energético, y puede oxidarse en una célula de combustible para generar electricidad sin liberar dióxido de carbono (CO₂), y puede producirse en lugares remotos sin infraestructura eléctrica ³⁴.

La generación de biohidrógeno a partir de residuos de forma sostenible será una alternativa viable ambientalmente para disminuir factores contaminantes y generar una forma de energía limpia y renovable pero aún se necesitan estudios de investigación y desarrollo considerables para mejorar la producción y evaluación del potencial de biohidrógeno, actualmente en Colombia dos empresas extranjeras *Ecowill Engineering Group* y la francesa *Mcphy energy* cuentan con diferentes patentes en los procesos de extracción y almacenamiento de hidrógeno con fines energéticos ³⁵.

Hallazgos recientes muestran que la producción de biohidrógeno a partir de sustratos obtenidos de biomasa mediante codigestión son procesos óptimos, dado que la biomasa se encuentra disponible, tiene un alto potencial energético y es biodegradable, esta técnica de producción tiene ventajas sobre otros procesos debido a su capacidad para producir hidrógeno de forma continua ³⁶.

Basados en las problemáticas ambientales que surgen a nivel mundial y también nacional, en Colombia ha surgido un interés por la búsqueda de energías no convencionales como lo muestra la nueva ley 1715 del 2014, la cual en el artículo 1 indica que: “tiene por objeto promover el desarrollo y la utilización de las fuentes no convencionales de energía, principalmente aquellas de carácter renovable en el sistema energético nacional, mediante su integración al mercado eléctrico, su participación en las zonas no interconectadas y en otros usos energéticos como medio necesario para el desarrollo económico sostenible. La reducción de emisiones de gases de efecto invernadero y la seguridad de abastecimiento

energético. Con los mismos propósitos se busca promover la gestión eficiente de la energía, que comprende la eficiencia como la respuesta de la demanda” ³⁷.

Esta investigación conduce a la evaluación del potencial de hidrógeno a partir de algunos materiales de desecho como subproductos agrícolas y algunos residuos orgánicos, actualmente estos no tienen valor comercial directo, su manejo es complicado y costoso, son abundantes, baratos, renovables y altamente biodegradables. Estos desechos son sustratos complejos que pueden ser reciclados y degradados biológicamente mediante la conversión de la biomasa para la producción de hidrógeno mediante la digestión anaeróbica la cual se convierte en una opción prometedora para la generación de esta como una energía.

Este análisis del estudio del arte pretende ampliar los conocimientos mediante investigaciones existentes sobre el tema para identificar el potencial de hidrógeno de los principales sustratos para posibles aplicaciones sostenibles mediante biomasa residual aprovechable que permita generar un tipo de energía alternativa, en escenarios agroindustriales de Santander.

3. OBJETIVOS

3.1 OBJETIVO GENERAL

Evaluar el potencial teórico de hidrógeno mediante codigestión anaerobia generado a partir de biomasa residual del sector agroindustrial en zonas seleccionadas de Santander.

3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Realizar vigilancia tecnológica para el proceso de codigestión anaerobia en la generación de hidrógeno.
- Identificar la biomasa residual con características adecuadas para la producción de hidrógeno.
- Determinar el potencial teórico de generación de hidrógeno en los procesos de codigestión de cada residuo.

4. MARCO REFERENCIAL

4.1 ANTECEDENTES

Los estudios realizados sobre la producción de hidrógeno se desarrollan teniendo en cuenta procesos y tratamientos. En los últimos años, se han registrado estudios sobre la producción de hidrógeno utilizando métodos amigables con el medio ambiente. Algunas de estas investigaciones se han centrado en la producción de hidrógeno a partir de mecanismos biológicos como la codigestión para generar sustancias químicamente útiles. El protocolo de Kioto en 1997 dio lugar a un renovado interés en la producción de combustibles limpios como el H_2 es una alternativa, dado que su principal ventaja es la generación de una combustión limpia.

En Las Calandrias, Cádiz, España por ejemplo el centro de tratamiento a gran escala de RSU (residuos sólidos urbanos) realizó un estudio sobre el “Aumento en la producción de hidrógeno por codigestión anaerobia de la fracción orgánica de los residuos sólidos urbanos y lodos para optimización de las condiciones de tratamiento” ³⁸. Los (RSU) residuos sólidos urbanos recogidos en una criba de 30 mm, después de las líneas de segregación mecánicas y manuales para la eliminación del material reciclable, se llevó a cabo la codigestión anaerobia termofílica a (55°C), de la fracción orgánica de los residuos sólidos municipales (*organic fraction of municipal solid waste* OFMSW) y lodos residuales (*sewage sludge* SS) para la producción de hidrógeno se estudió en varias combinaciones de lodo (lodo primario (*primary sludge* PS); lodos activados de residuos (*waste activated sludge*, WAS); y lodos mixtos (*mixed sludge* MS), las concentraciones de sólidos totales (*Total Solids* TS) fueron entre (10-25%). La codigestión de la OFMSW y SS mostró una tasa de producción de hidrógeno del 70% en la tasa de producción de hidrógeno. La codigestión de la OFMSW con MS mostró un potencial de producción de hidrógeno de 47% y 115% el más alto en comparación con la OFMSW + PS y OFMSW + WAS, respectivamente.

La generación de biohidrógeno de la digestión anaeróbica de los residuos de alimentos de dos restaurantes de comida rápida china ³⁹, después de quitar los huesos y conchas, los restos de alimento se molieron y mezclaron a fondo en una licuadora y se almacenaron en botellas de vidrio selladas en un refrigerador a 4°C. Antes de la digestión anaerobia, los residuos de alimentos se mantuvieron a temperatura ambiente (22 ± 1°C). Se determinaron las condiciones óptimas de digestión anaeróbica un pH inicial de 7, se obtuvo una producción de biohidrógeno específica para 155,2 ml / g de sólidos volátiles (*volatile solids* VS) en los residuos de alimentos de un 68%.

La producción de hidrógeno a partir de frutas podridas en tres etapas de fermentación, en la primera una etapa anaerobio facultativo, se utilizó *Escherichia*

coli basada en el consumo O_2 y mantener estrictas condiciones anaeróbicas para una segunda etapa fermentativa oscura para la producción de H_2 . Posteriormente, un tercer etapa foto fermentación usando *Rhodobacter capsulatus*. El rendimiento máximo total de H_2 en las tres etapas sugiere que las frutas podridas pueden utilizarse de manera eficiente para la producción de H_2 comercial ⁴⁰.

Un estudio similar fue la producción biohidrógeno de melaza de remolacha azucarera como materia prima por secuencial oscura y fotofermentación ²⁶. En un fase termófilo se utilizó *Caldicellulosiruptor saccharolyticus* para la fermentación oscura, y varias bacterias fotosintéticas (*Rhodobacter capsulatus* tipo salvaje, *R. capsulatus* Hup - mutante, y *Rhodopseudomonas palustris*) se hizo crecer en un biorreactor de pH controlado por lotes, la melaza con una concentración inicial de sacarosa de 15 g/l, se determinó la influencia de la adición de NH_4^+ y extracto de levadura sobre el consumo y la producción de hidrógeno. El rendimiento más alto de hidrógeno (4,2 mol de H_2 / sacarosa mol) y la productividad volumétrica máxima (7,1 mmol H_2 / L c.h) se obtuvieron en ausencia de NH_4^+ . El efluente de la fermentación oscura que no contiene NH_4^+ se introdujo en un foto-biorreactor, y la producción de hidrógeno se controló bajo iluminación continua. La productividad y el rendimiento se mejoraron mediante la dilución del efluente oscuro fermentador (DFE) y las adiciones de tampón, hierro-citrato y molibdato de sodio. El mayor rendimiento de hidrógeno (58% de los ácidos orgánicos consumidos) y la productividad (1,37 mmol H_2 / L)

Según las investigaciones se demuestra que el hidrógeno es un gas valioso como fuente de energía limpia y como materia prima para algunas industrias. Por lo tanto, la demanda de producción de hidrógeno ha aumentado considerablemente en los últimos años. La electrólisis del agua, el reformado con vapor de hidrocarburos y procesos auto-térmica son métodos bien conocidos para la producción de gas de hidrógeno, pero no rentable debido a los requisitos de alta energía. La producción biológica de gas hidrógeno tiene ventajas significativas sobre los métodos químicos. Los principales procesos biológicos utilizados para la producción de gas de hidrógeno son biofotólisis del agua por las algas y fotofermentación de materiales orgánicos, por lo general los hidratos de carbono por bacterias. Uno de los principales problemas en la producción de hidrógeno por fotofermentación es el costo de la materia prima ²⁹.

En Colombia el proceso de codigestión para la producción de hidrógeno tiene estudios relevantes como el uso del mucílago de café, sustrato producido como residuos procedentes de la actividad agrícola en Colombia, este estudio evaluó la codigestión de mucilago de café y estiércol de cerdo para mejorar la producción de hidrógeno ⁴¹.

En este estudio se evaluó la producción de hidrógeno de cuatro condiciones de codigestión anaerobia; los tres primeros estaban relacionados con la relación de mezcla entre dos sustratos estiércol y mucílago de café; estos sustratos se

establecieron a través de DQO total con una carga orgánica inicial de $\pm 6,5$ kg DQO/m³d. La cuarta condición fue desarrollado para la mejor relación sustrato; la carga orgánica se duplicó a $\pm 12,1$ kg DQO/m³ d. La tasa de producción de hidrógeno promedio fue de 7,6 NL H₂/L_{CMD} ⁴¹.

Los estudios reportados de diferentes tipos de biomasa como por ejemplo estudios con la palma de aceite se exploró la condición óptima para la hidrólisis del tronco de palma de aceite mediante el método de microondas H₂SO₄, la producción de hidrógeno a partir de hidrolizado del tronco de la palma de aceite utilizando la metodología de superficie de respuesta con diseño de compuesto central. La condición óptima para la hidrólisis fue de 1,56% (p/v) de H₂SO₄ y 7,50 min de tiempo de reacción a 450 W. La condición óptima obtenida fue un pH inicial de 6,03, una concentración inicial de sustrato de 22,07 g / l y una concentración de NaHCO₃ de 6,71 g / l en la que se alcanzó una producción de hidrógeno de 1947 ml de H₂/L. El análisis de la comunidad microbiana indicó que *Clostridium sp* y *Lactobacillus sp* fueron las especies predominantes en la condición óptima ⁴². O con esta misma biomasa se investigó la co-fermentación del efluente del molino de aceite de palma para la producción de hidrógeno por *Thermoanaerobacterium thermosaccharolyticum* en condiciones termofílicas. La producción de hidrógeno a partir de la co-fermentación fue de 2,6 y 1,7 L-H₂ / L de efluente. La producción de hidrógeno de 7,2 L-H₂ / L y la tasa de producción de hidrógeno de 18,1 mmol-H₂ / L / h se logró a partir del funcionamiento continuo a largo plazo. Los metabolitos solubles estaban dominados por ácido acético y ácido butírico ⁴³.

Por otra parte se han registrado estudios para la producción de hidrógeno por cultivo discontinuo de cepa de Bacillus Sp. utilizando extracto de bagazo de caña de azúcar como fuente de carbono, el objetivo del estudio fue optimizar el costo de producción y se evaluó parámetros como el efecto del tiempo, pH inicial, temperatura y concentración de extracto donde se encontraron los valores óptimos: tiempo 48 h, pH inicial 7,0, Temperatura - 32°C, y extracto de bagazo - 1,0% (v/v). En estas condiciones optimizadas se encontró que la producción máxima de hidrógeno era 0,23 mol H₂/mol sustrato ⁴⁴.

De lo anterior se puede concluir que la producción de biohidrógeno a través de diferentes mecanismos principalmente anaerobios se realizan utilizando residuos orgánicos, pero los rendimientos no solo dependen de estos sino de las condiciones de operación del proceso; este mecanismo ha aumentado la atención en los últimos años debido a las ventajas económicas y de producción de energía limpia a partir del tratamiento de los residuos biológicos que pueden generar diferentes tipos de industrias; así se encuentra que para un mismo sustrato los rendimientos son diferente, por ejemplo el bagazo de palma de aceite ha reportado rendimientos de 1947 ml de H₂/L ⁴², 7.2 L H₂/EPPA and 18.1 mmol H₂/L/h ⁴³; con estudios realizado con bagazo de caña de azúcar se reportan rendimientos de 0.23 mol H₂/mol sustrato ⁴⁴, 0,30 NL H₂·g ⁴⁵, 0,83 NL H₂·g ⁴⁶ y 1,73 mol H₂/mol ⁴⁷, en el caso del mucilago de café 7,6 NL H₂/L_{CMD} ⁴¹, la porcinaza 1,57 mol-H₂/mol-azúcar ⁴⁸, 9,81 L H₂ /6 L

estiércol ²⁸, 7,6 ml d⁻¹ (g VS) ⁴⁹, y la bovinaza 743 ml H₂/ Kg estiércol de vaca ⁵⁰, 33,1 mL g⁻¹ VS ⁵¹.

4.2 MARCO CONCEPTUAL

4.2.1 Residuos orgánicos biodegradables. Cualquier objeto, material, sustancia o elemento resultante del consumo o uso de un bien, actividades domésticas, industriales, comerciales, institucionales, de servicios, que el generador abandona, rechaza o entrega y que es susceptible al aprovechamiento o transformación de un nuevo bien, con valor económico o de disposición final es considerado residuo biodegradable ²³.

Los residuos orgánicos biodegradables se pueden clasificar en aprovechables y no aprovechables. Dentro de los aprovechables encontramos aquellos que pueden ser degradados por los seres vivos y transformados por microorganismos como bacterias, hongos y otros agentes biológicos ²². Se incluyen restos vegetales, frutas, residuos de comidas, verduras, restos de podas y residuos de jardinería entre otros residuos que puedan ser transformados fácilmente en materia orgánica ¹³.

La composición de estos desechos producidos por un país, región o comunidad está relacionado con el estilo de vida, costumbres culturales e infraestructura económica²². La mayoría de las actividades humanas producen desechos sólidos en gran parte biodegradables.

La composición fisicoquímica de los desechos biodegradables es fundamentalmente carbono, hidrógeno, oxígeno, nitrógeno y azufre y altos contenidos de humedad ¹³.

Los residuos más generados corresponden a los desechos sólidos domésticos tienen un porcentaje de biodegradables del de un 62% a un 85%, pero uno de los sectores más productivos de biodegradables son la agricultura y la agroindustria ²⁴.

Los residuos orgánicos industriales son tan amplios como el número de industrias existentes, en los últimos años la fracción de residuos de este tipo ha aumentado de manera significativa mundialmente; el tipo de tratamiento de los residuos producidos depende, nuevamente, del tipo de residuos de que se trate, siendo las principales vías la valorización, el uso como subproducto, tratamiento físico-químico o biológico, vertido controlado e incineración ²³.

Por otra parte los residuos orgánicos ganaderos o los residuos agrícolas son la mayor fuente de residuos y de potencial contaminante, y dentro de éstos, los residuos ganaderos constituyen el principal problema ambiental. La problemática asociada a la gestión de los residuos orgánicos de origen ganadero se debe, básicamente, a la separación progresiva de la explotación ganadera y la agrícola,

de forma que la mayoría de las explotaciones no poseen una base territorial suficiente para reutilizar los residuos ganaderos ⁵².

Esto, junto con el aumento del censo ganadero, la disminución de la superficie agrícola útil, y el aumento de las dimensiones de las explotaciones ganaderas, hace equiparable el sector ganadero con la industria en cuanto a la problemática de gestión de residuos; la cantidad y calidad de residuos producida varía mucho, dependiendo del tipo de animal, de la composición de la alimentación y del sistema de manejo de la granja (sistema de alimentación, bebederos, sistema de limpieza, tipo de estercolero o balsa, etc.)^{13,53}.

4.2.2 Tratamiento de los residuos mediante codigestión anaeróbica y producción de hidrógeno. Actualmente los problemas ambientales se han incrementado por la cantidad de efluentes contaminantes producidos por diferentes actividades económicas a nivel mundial. Actividades de la industria porcina por ejemplo se han convertido en una problemática ambiental debido principalmente a la inadecuada disposición de los residuos orgánicos generados de esta, desafortunadamente no se consideran las riquezas de los desechos y son tratados como un problema del cual hay que librarse, las excretas porcinas líquidas tienen un enorme potencial por su concentración de nutrientes y energía que podrían ser aprovechados de diferentes formas, una de ellas mediante la producción de biogás⁵⁴.

La capacidad de captar y reciclar este tipo de material generaría la producción de energía y sería una alternativa que además llevaría a no disponerla en el ambiente para evitar o disminuir la contaminación de agua y suelos ⁵⁵.

El uso de este biogás puede proporcionar los medios para contribuir a la reducción global de gases de efecto invernadero y aumentar los esfuerzos para lograr el desarrollo sostenible mediante la generación de energía ⁵⁶.

La necesidad de energía en todo el mundo ha aumentado de manera exponencial, las reservas de combustibles fósiles han disminuido y de forma adicional su combustión tiene graves efectos negativos sobre el medio ambiente a causa de las emisiones de CO₂ ³⁸. Por estas razones, muchos investigadores han estado trabajando en la exploración de nuevas fuentes de energía sostenibles que podrían sustituir los combustibles fósiles ⁵⁷.

El hidrógeno es considerado como un combustible alternativo viable y "portador de energía" para el futuro, es una fuente de energía limpia en comparación con los combustibles de hidrocarburos, sin emisiones de CO₂ y puede ser fácilmente utilizado en pilas de combustible para la generación de electricidad ⁵⁸. A diferencia de los combustibles fósiles, petróleo, gas natural y biomasa, el principal problema en la utilización de gas hidrógeno como combustible es su indisponibilidad en la naturaleza y la necesidad de métodos de producción de bajo costo ⁵³.

Se ha informado que 50 millones de toneladas de hidrógeno se negocian cada año en todo el mundo con una tasa de crecimiento de casi el 10% anual, por el momento ⁵⁹. Basado en el programa de hidrógeno Nacional de los Estados Unidos, la contribución total de energía por hidrógeno en el mercado será de 8-10% en 2025 ³³.

4.2.3 Digestión anaeróbica. La digestión anaeróbica es un proceso biológico degradante que mediante fermentación anaerobio de los materiales orgánicos de un sustrato son convertidos en biogás ⁶⁰.

Utilizando el proceso de digestión anaerobia es posible convertir gran cantidad de residuos: residuos vegetales, estiércoles, efluentes de la industria alimentaria y fermentativa, de la industria papelera y de algunas industrias químicas, aguas residuales en subproductos útiles ⁶¹, es decir, conversión de materia orgánica compleja en metano y dióxido de carbono en ausencia de oxígeno y con la interacción de diferentes poblaciones bacterianas ⁶².

Además de la producción de energía renovable, 90% de la energía disponible por oxidación directa se transforma en metano, consumiéndose sólo un 10% de la energía en crecimiento bacteriano; las ventajas de la digestión anaeróbica incluyen la reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero, de olores y patógenos y la producción de un sustrato líquido con capacidad fertilizante ⁶¹.

La digestión anaerobia es un proceso de transformación y no de destrucción de la materia orgánica, como no hay presencia de un oxidante en el proceso. En vista de que no hay oxidación, se tiene que la mayor parte de la DQO es convertida a metano (90 – 97 %), y una mínima parte en lodo (3 a 10%)⁶³. En las reacciones bioquímicas que ocurren en la digestión anaerobia, solo una pequeña parte de la energía es liberada, mientras que la mayor parte de esa energía permanece como energía química en el metano producido ⁶⁴.

4.2.3.1 Procesos involucrados en la digestión anaeróbica. Cuatro procesos biológicos están implicados en la digestión anaeróbica:

- 1. La hidrólisis** indica la conversión de compuestos orgánicos complejos e insolubles (hidratos de carbono, proteínas y lípidos) que se lleva a cabo por las enzimas extracelulares llamadas hidrolasas que se excretan por diferentes bacterias ⁵⁵. Estas enzimas ejercen un efecto catalítico hidrolizante ⁶⁵.

Las moléculas hidrolizadas son compuestos más sencillos y solubles en agua que incluyen aminoácidos, azúcares, ácidos grasos de cadena larga y alcoholes ⁶⁶. Esta etapa es fundamental para suministrar los compuestos orgánicos necesarios para la estabilización anaerobia en forma que puedan ser utilizados por las bacterias responsables de las etapas siguientes.

2. **Acidogénesis** los compuestos orgánicos sencillos generados en la hidrólisis son utilizados por las bacterias generadoras de ácidos, como resultado se produce su conversión en ácidos orgánicos volátiles, fundamentalmente en ácidos acéticos, propiónico y butírico ⁶⁷.

Esta etapa la pueden llevar a cabo bacterias anaerobias o facultativas ⁶⁸. Las moléculas orgánicas solubles son fermentadas por varios organismos fermentativos formando compuestos que pueden ser utilizados directamente por las bacterias metanogénicas (acético, fórmico, H₂) y compuestos orgánicos más reducidos (láctico, etanol, propiónico, butírico, principalmente) que tienen que ser oxidados por bacterias acetogénicas a sustratos que puedan utilizar las metanogénicas ⁶⁹.

3. **Acetogénesis** Los productos de fermentación, la degradación de ácidos grasos de cadena larga se convierte en acetato e hidrógeno se lleva a cabo por bacterias productoras de hidrógeno obligado acetogénicas ⁷⁰.

Mientras que algunos productos de la fermentación pueden ser metabolizados directamente por los organismos metanogénicos (H₂ y acetato), otros (valerato, butirato, propionato, algunos aminoácidos, etc.) necesitan ser transformados en productos más sencillos, acetato e hidrógeno, a través de las bacterias acetogénicas ⁷¹.

4. **Metanogénesis** se lleva a cabo por la archaea metanogénicas las cuales crecen muy lentamente y son menos resistentes al estrés que las bacterias ⁵⁵. Acetato, hidrógeno y dióxido de carbono son los principales sustratos para microorganismos metanogénicos, aunque algunas especies también son capaces de metabolizar formol, metanol o butirato ⁷². Metanogénesis es la fase limitante de los sustratos fácilmente degradables. La tasa de crecimiento lento de arqueas a menudo resulta en la acumulación de ácidos grasos volátiles y la consecuente inhibición de la actividad de microorganismos metanogénicos ⁷³.

Una vez que se han formado ácidos orgánicos, y acetato, una nueva categoría de bacterias entra en acción, y los utiliza para convertirlos finalmente en metano y dióxido de carbono.

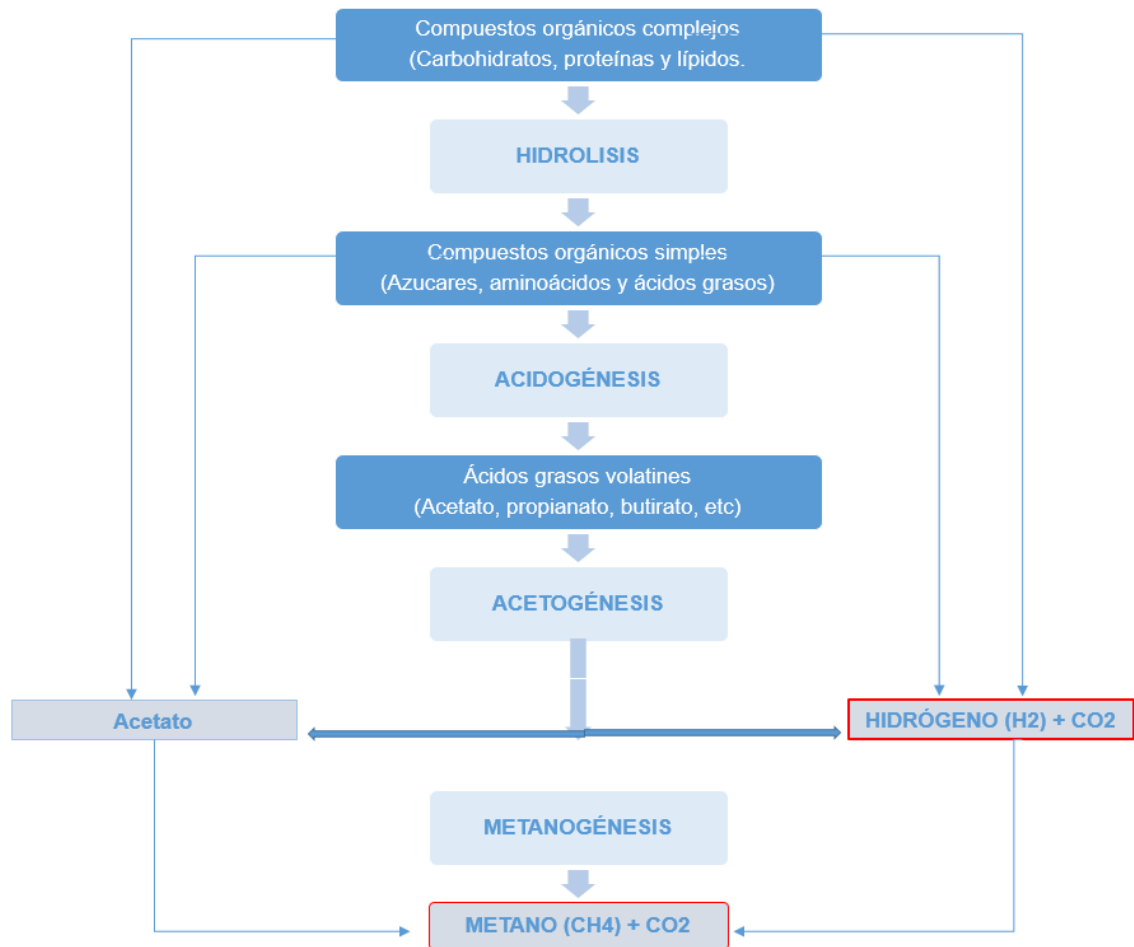
Esta fase de la depuración anaerobia es fundamental para conseguir la eliminación de materia orgánica, puesto que los productos finales no contribuyen a la DBO o DQO del medio ⁶⁷.

4.2.3.2 Diferencias entre las condiciones para la producción de metano e hidrógeno a través de la digestión anaerobia. En la Figura 1 se muestra las fases del proceso de digestión anaerobia y los productos intermedios generados.

La principal vía de producción de biohidrógeno es la transformación de compuestos orgánicos simples y ácidos grasos volátiles y para el metano es la correspondiente a la transformación del ácido acético ⁷⁴.

Estos procesos se consideran lentos y constituyen etapas limitantes del proceso de degradación anaeróbica. Las fermentaciones se llevan a cabo a diferentes temperaturas, desde mesófilas (25-40°C), hasta termófilas (>50°C)⁷⁵, produciéndose además del hidrógeno y el metano que se produce en la degradación de la materia orgánica en condiciones anaerobia una mezcla de gases como N₂, CO₂, CO, H₂S³¹. La composición o riqueza del biogás depende del sustrato digerido y del funcionamiento del proceso.

Figura 1. Esquema de reacciones de digestión anaerobia



Fuente: Adaptado de Pavlostathis, S.G., Giraldo-Gómez, E. 1991

La producción biológica de hidrógeno por su parte se debe principalmente a la presencia en las células de enzimas como la hidrogenasa y la nitrogenasa⁷⁶. La hidrogenasa está ampliamente distribuida en los microorganismos anaeróbicos. Las especies bacterianas más conocidas que producen hidrógeno por este sistema son las que corresponden a los géneros *Enterobacter*, *Bacillus* y *Clostridium*⁷⁷.

La producción de hidrógeno por estas bacterias depende de condiciones del proceso como pH, tiempo de retención hidráulica y presión parcial del gas. La formación de los productos depende también de las condiciones ambientales en las cuales los microorganismos crecen. Productos como etanol, butanol y lactato, contienen hidrógeno que todavía no se ha liberado; así, para maximizar la cantidad de hidrógeno, el metabolismo de la bacteria debe enfocarse hacia la producción de ácidos grasos volátiles ^{78,79}.

La nitrogenasa está presente en gran cantidad de microorganismos fijadores de nitrógeno, puede producir hidrógeno en una reacción irreversible de forma continua, incluso con saturación de producto. Esta enzima es empleada para reducir el N_2 a NH_3 ; sin embargo, cuando hay ausencia de N_2 , reduce los H^+ a hidrógeno consumiendo 4 moles de ATP. Se ha encontrado que además del N_2 , el O_2 y el NH_4^+ pueden inhibirla ⁸⁰.

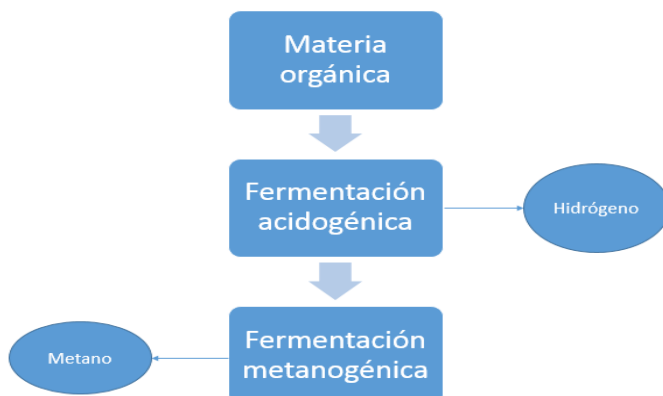
Por otra parte el proceso anaeróbico puede producir gas metano por la reducción de CO_2 o a partir de moléculas orgánicas mediante microorganismos anaerobios a través de la conversión de estos substratos monocarbonados o con átomos de carbono unidos por un enlace covalente como el acetato, H_2 , CO_2 , formato, metanol y algunas metilaminas⁸¹.

Este grupo de microorganismos arqueas metanogénicas reducen a dióxido de carbono la materia orgánica empleando el hidrógeno como donador de electrones y descarboxilan el acetato para formar CH_4 . Las bacterias metanogénicas se clasifican en dos grandes grupos las que convierten el acetato o metanogénicas acetoclásticas y las que utilizan hidrógeno o acetogénicas hidrogenotróficas. Cerca del 70% del metano producido proviene del acetato, el resto proviene del H_2 y el CO_2 ⁷⁴. La presencia de consumidoras de H_2 tales como las bacterias homoacetogénicas, metanogénicas, y reductoras de nitratos y sulfatos son otro factor que reduce la producción de hidrógeno⁸².

De acuerdo a lo anterior y como se plantea en la figura 2, se muestra la diferencia entre el proceso para la producción de hidrógeno “hidrogenogénico” y la producción de metano “metanogénico”.

El proceso hidrogenogénico consiste en la hidrólisis de la materia orgánica con el fin de producir hidrógeno además de los ácidos orgánicos normales del proceso; la etapa de metanogénesis produce una conversión de los ácidos orgánicos en metano como se señaló anteriormente.

Figura 2. Diagrama de flujo del proceso hidrogenogénico y metanogénico



Fuente: Adaptado de producción de hidrógeno y metano como biocombustibles bajo el esquema de biorrefinería.

4.2.3.3 Tipo de residuos para la obtención de hidrógeno. Residuos carbonosos gaseosos, líquidos y sólidos como fuentes renovables para la formación de gas de hidrógeno por reformado con vapor ^{30,39}. A pesar del bajo costo de los materiales de desecho utilizados, el uso de alta temperatura ($T = 1200^{\circ}\text{C}$) es la principal limitación para este proceso.

La biomasa y el agua pueden ser utilizadas como recursos renovables para la producción de gas hidrógeno.

De acuerdo con el desarrollo sostenible y la minimización de residuos, la producción de gas biohidrógeno a partir de fuentes renovables, también conocido como "tecnología verde" ha recibido una considerable atención en los últimos años ⁶³.

La producción de biohidrógeno puede ser realizada mediante procesos anaerobios y microorganismos fotosintéticos utilizando materias primas ricas y no tóxicas, de hidratos de carbono ⁶⁸. Bajo condiciones anaeróbicas, el hidrógeno se produce como un subproducto durante la conversión de residuos orgánicos en ácidos orgánicos que se utilizan para la generación de metano. Fases acidogénicas de la digestión anaerobia de desechos puede ser manipulada para mejorar la producción de hidrógeno ⁶⁸. Procesos fotosintéticos incluyen algas que utilizan CO_2 y H_2O para la producción de gas de hidrógeno ³⁰. Algunas bacterias foto heterótrofas utilizan ácidos orgánicos tales como ácido acético, ácido láctico y butírico para producir H_2 y CO_2 ⁷⁹. Las ventajas de este método para la producción de H_2 gaseoso es la utilización de materiales de desecho.

La producción de energía limpia y la utilización de materiales de desecho para la producción biológica de hidrógeno se convierte en un enfoque novedoso y prometedor para satisfacer las crecientes necesidades de energía como sustituto de los combustibles fósiles.

Los criterios principales para la selección de los materiales de desecho en la producción de biohidrógeno dependen de la disponibilidad, el costo, el contenido de carbohidratos y la facilidad de biodegradabilidad ³¹.

Los azúcares simples tales como glucosa, sacarosa y lactosa son sustratos fácilmente biodegradables y eficientes para la producción de hidrógeno. Sin embargo, las fuentes de hidratos de carbono puros son costosas; los materiales de desecho generados por la industria agrícola, porcícola y alimentaria que contienen almidón y/o celulosa compuestos ricos en hidratos de carbono se pueden utilizar para la producción de gas de hidrógeno ²⁶. El almidón puede ser hidrolizado a la glucosa y la maltosa por hidrólisis ácida o enzimática seguida de conversión de carbohidratos a ácidos orgánicos y luego a gas hidrógeno. La celulosa que contiene los desechos agrícolas requiere un mayor pre tratamiento. Los residuos agrícolas deben ser molidos y luego des - lignificados por medios mecánicos o químicos antes de la fermentación. La celulosa y la hemicelulosa contenido de tales desechos se pueden hidrolizar a los carbohidratos que se procesan adicionalmente para el ácido orgánico y la producción de gas hidrógeno ²⁷.

Otro de los residuos donde se hallan algunos hidratos de carbono y compuestos biodegradable son los efluentes industriales no tóxicos, tales como la industria lechera, molino de oliva, levadura de cervecería y aguas residuales de panadería los cuales pueden ser utilizado como materia prima para la producción de biohidrógeno. Estas aguas residuales pueden requerir un tratamiento previo para eliminar los componentes indeseables y para el equilibrio nutricional ²⁵.

El lodo, residuo generado en las plantas de tratamiento de aguas residuales también es considerado un generador de energía como metano y biohidrógeno debido a que contiene grandes cantidades de hidratos de carbono y proteínas ²⁵. La digestión anaerobia de fangos en exceso se puede realizar en dos pasos. En el primero la materia orgánica se convierte en ácidos orgánicos, (fase acidogénica) y los ácidos orgánicos se utilizarán para la producción de gas de hidrógeno en el segundo paso mediante el uso de bacterias fotoheterotrófica ³⁸.

4.2.4 Definición Biomasa. La biomasa es una fuente de energía fundamental para la creación de una sociedad sostenible, debido a su capacidad de renovación, baja o nula emisión de carbono, y bajo impacto ambiental ⁸³.

Es la materia viva presente en una capa fina de la superficie terrestre, los residuos que se generan a partir de los procesos de transformación natural o artificial de la materia también se constituyen en biomasa. Es un recurso muy variado debido a su producción y origen en los sistemas terrestres y acuáticos, lo que influye directamente sobre sus características físicas y químicas ⁸⁴ como se muestra en el cuadro 1.

Se considera renovable porque forma parte del flujo natural y repetitivo de los procesos en la naturaleza, siendo las plantas quienes inician este proceso con la

fotosíntesis, para captar la energía del sol. La biomasa es un elemento indispensable para mantener el equilibrio ecológico y permite conservar y enriquecer la diversidad biológica y el suelo ^{13,85}.

Cuadro 1. Clasificación de la biomasa de acuerdo a su procedencia.

Tipos de biomasa	
Biomasa natural	Se produce de forma espontánea en la naturaleza, sin intervención humana. Por ejemplo, las podas naturales de los bosques.
Biomasa residual seca	Procede de recursos generados en las actividades agrícolas y forestales, así como en las industrias agroalimentaria y maderera (ej. aserrín).
Biomasa residual húmeda	Procede de vertidos biodegradables formados por aguas residuales urbanas e industriales y también de los residuos ganaderos (el guano, por ejemplo).
Cultivos energéticos	Su única finalidad es producir biomasa transformable en combustible. Cultivos herbáceos, leñosos, industriales, agrícolas y acuáticos que incluye los cereales, oleaginosas, remolacha y los cultivos lignocelulósicos.

Fuente: Posibilidades de aprovechamiento económico de la biomasa residual ²¹

4.3.1.1 Fuentes de la biomasa residual. La biomasa residual hace referencia a los subproductos que se derivan de las transformaciones naturales o industriales que se llevan a cabo en la materia orgánica, en el cuadro 2 se muestran algunas de las fuentes generadoras de la biomasa.

Cuadro 2. Fuentes Generadoras de Biomasa

Fuente generadora de biomasa	Tipo de residuo	Características físicas
Residuos forestales	restos de aserrío: corteza, aserrín, astillas	polvo, sólido, hr1 >50%
	restos de ebanistería: aserrín, trozos, astillas	polvo, sólido, hr 30-45%
	restos de plantaciones: ramas, corteza, raíces	sólido, hr >55%
Residuos agropecuarios	cáscara y pulpa de frutas y vegetales	sólido muy húmedo
	cáscara y polvo de granos secos	polvo, hr <25%
	estiércol	sólido muy húmedo
	tallos, hojas, cáscaras, maleza, pastura	sólido hr >55%

Continuación cuadro 2.

Residuos industriales	pulpa y cáscara de frutas y vegetales	sólido moderadamente húmedo
	residuos de procesamiento de carnes	sólido muy húmedo
	aguas de lavado de carnes y vegetales	líquido
	grasas y aceites vegetales	líquido grasoso
Residuos urbanos	aguas negras	líquido
	desechos domésticos orgánicos	sólido muy húmedo
	basura orgánica	sólido muy húmedo

Fuente: Manuales sobre energía renovable: Biomasa ¹⁵

La biomasa para usos bioenergéticos de origen animal o vegetal depende de condiciones físicas, de acuerdo a la cantidad de humedad presente los procesos de transformación para su tratamiento y destino mostrados en el cuadro 3.

Cuadro 3. Procesos de transformación de la biomasa de acuerdo a su humedad

Característica	Proceso		
Biomasa húmeda $\geq 60\%$	Bioquímico	Fermentación	Aeróbico
			Anaeróbico
Biomasa seca $\leq 60\%$	Termoquímico	Combustión Pirolisis Licuefacción Gasificación	

Fuente: Energía obtenida a partir de biomasa ⁸⁴

4.3.1.2 Composición química de la biomasa residual. La biomasa residual está compuesta de grandes cantidades de compuestos como se muestra en el cuadro 4 como carbono, oxígeno e hidrógeno, las cadenas largas de tipo **CnHm** constituyen los compuestos involucrados en las reacciones exotérmicas generadoras de energía ¹³.

En general se puede considerar que el poder calorífico de la biomasa puede oscilar entre:

- Los 3000 – 3500 kcal/kg para los residuos lignocelulósicos
- Los 2000 - 2500 kcal / kg para los residuos urbanos
- Los 10000 kcal / kg para los combustibles líquidos provenientes de cultivos energéticos

Cuadro 4. Composición química de diferentes formas de biomasa

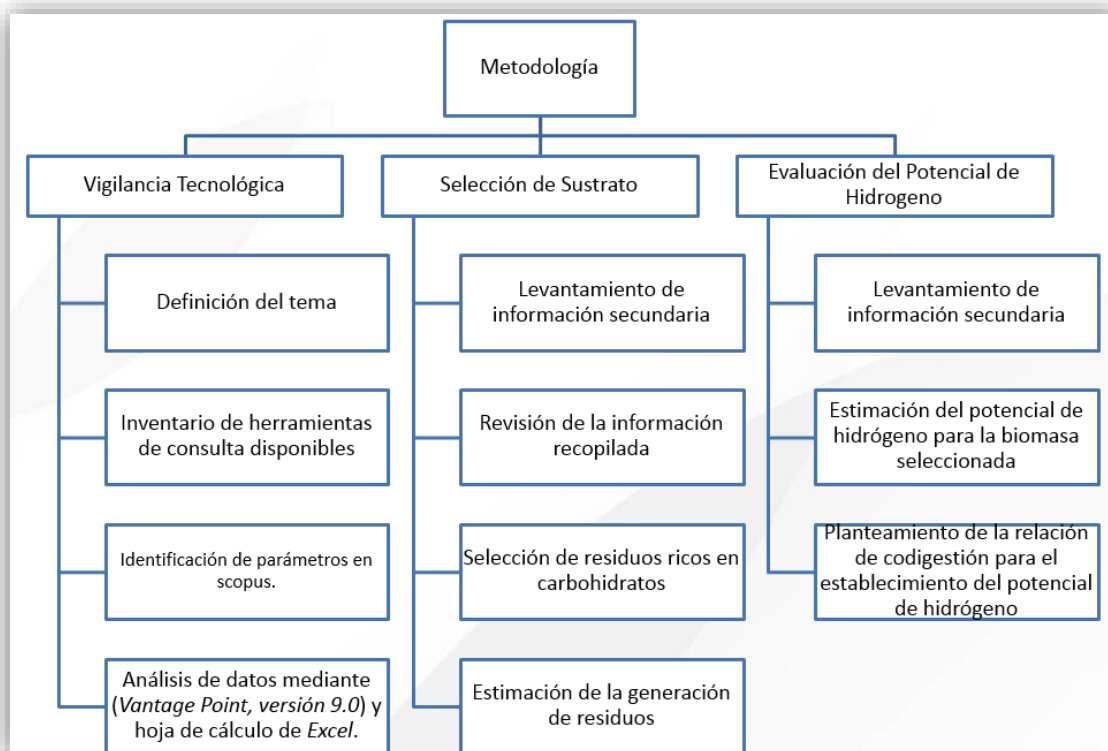
Tipo de Biomasa		Madera							
		Sauce	Madera Suave	Corteza de Madera Dura	Madera Dura	Eucalipto	Roble	Corteza de Pino	Aserrín Pino
% En Peso Sin Humedad	C	47,66	52,10	50,35	50,48	50,43	49,89	52,30	52,49
	H	5,2	6,10	5,83	6,04	6,01	5,98	5,80	6,24
	N	0,3	0,20	0,11	0,17	0,17	0,21	0,29	0,15
	O	44,70	39,90	39,62	42,43	41,53	42,57	38,76	40,45
	S	0,03	-	0,07	0,08	0,08	0,05	0,03	0,03
	Cl	0,01	-	0,03	0,02	0,02	0,01	0,01	0,04
	Ceniza	1,45	1,70	3,99	0,78	1,76	1,29	2,90	0,60
Tipo de Biomasa		Sub-productos agrícolas							
		Brizna de Trigo	Caña de Azúcar	Bagazo de Caña	Paja de Arroz	Cascarilla de Arroz	Paja de Maíz	Olote de Maíz	Fibra de Coco
% En Peso Sin Humedad	C	39,07	44,80	46,95	39,65	38,68	46,91	47,79	50,29
	H	4,77	5,35	5,47	4,88	5,14	5,47	5,64	5,05
	N	0,58	0,38	0,38	0,92	0,41	0,56	0,44	0,45
	O	50,17	39,55	39,55	35,77	37,45	42,78	44,71	39,63
	S	0,08	0,01	0,01	0,12	0,05	0,04	0,01	39,63
	Cl	0,37	0,12	0,12	0,50	0,12	0,25	0,21	0,28
	Ceniza	4,96	9,79	9,79	18,16	18,15	3,99	1,2	4,14

Fuente: Manuales sobre energía renovable: Biomasa ¹⁵

5. DISEÑO METODOLÓGICO

A continuación, se presenta la metodología empleada durante el desarrollo del presente proyecto de trabajo de grado.

Figura 3. Metodología



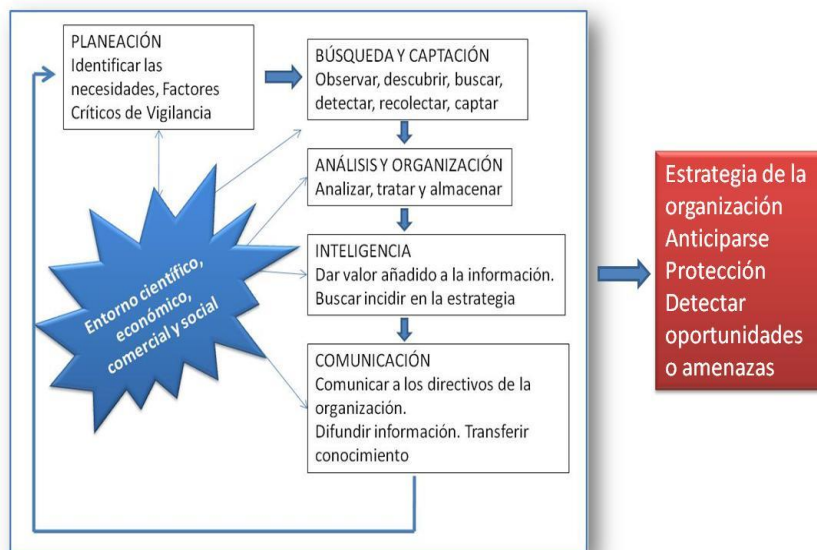
Fuente: propia

5.1 VIGILANCIA TECNOLÓGICA

La vigilancia tecnológica se define como un proceso sistemático en el que se capta, analiza y difunde información de diversa índole —económica, tecnológica, política, social, cultural, legislativa—, mediante métodos legales, con el ánimo de identificar y anticipar oportunidades o riesgos, para mejorar la formulación y ejecución de la estrategia de las organizaciones (Figura 4) ⁸⁶.

La Cienciometría es una herramienta de la vigilancia tecnológica que emplea técnicas matemáticas y análisis estadístico para determinar las características de la investigación científica, permite definir la situación de un área de conocimiento, una institución, un individuo e incluso un país mediante la actividad o productividad científica.

Figura 4. Proceso metodológico de la vigilancia tecnológica ⁸⁶.



En la figura 4 se puede observar el proceso metodológico de la vigilancia tecnológica trabajado en este estudio para la evaluación del potencial teórico de la producción de biohidrógeno a partir de biomasa contempló las etapas de planeación, búsqueda, captación, análisis y organización de la información con el fin de dar valor agregado a través de la inteligencia y, finalmente, la presentación de los resultados obtenidos, con la finalidad de identificar los principales sustratos o tipos de biomasa que se generan en el país y que reúnan las características adecuadas para ser aprovechados en procesos de codigestión, como una posible fuente de energía alternativa en el departamento de Santander para posibles aplicaciones sostenibles.

El desarrollo del trabajo contempló las siguientes actividades:

- Definición del tema
- Inventario de herramientas de consulta disponibles
- Identificación de descriptores, definición de las ecuaciones de búsqueda, tipo de documentos a analizar (artículos científicos).
- Análisis de datos mediante un programa de minería de textos (*Vantage Point*, versión 9.0) y hoja de cálculo de *Excel*.
- Elaboración del informe final.

Para la identificación de descriptores, definición de las ecuaciones de búsqueda, tipo de documentos a analizar (artículos científicos), se empleó la base de datos de *Scopus* (*Elsevier*, B.V. 2016) para realizar una revisión bibliográfica de manera muy general con el fin de establecer la actividad científica alrededor del tema de producción de biohidrógeno a partir de biomasa. Una vez identificados los términos o palabras clave, se estructuró la siguiente ecuación de búsqueda: ((TITLE-ABS-

KEY ("biohydrogen production" OR "hydrogen production" OR "potential hydrogen") AND TITLE-ABS-KEY (biomass OR waste*)) AND DOCTYPE (ar) AND SUBJAREA (mult OR agri OR bioc OR immu OR neur OR phar OR mult OR ceng OR CHEM OR comp OR eart OR ener OR engi OR envi OR mate OR math OR phys) AND PUBYEAR > 1999) OR ((TITLE-ABS-KEY ("biohydrogen production" OR "hydrogen production" OR "potential hydrogen") AND TITLE-ABS-KEY (biomass OR waste* OR "sweet cane" OR swine OR potato*)) AND DOCTYPE (ar) AND PUBYEAR > 1999). En la cual se evaluaron artículos científicos indexados en la base de datos referencial de Scopus, durante el período de tiempo 2000 – 2016 (a la fecha).

Los registros obtenidos se evaluaron empleando el software especializado para minería de texto (*Text mining*)¹ de *Vantage Point*, (Licencia académica 9.0, *Search Technology, Inc*), disponible en la unidad de bibliometría de la Universidad Santo Tomás, Seccional Bucaramanga. Este programa permite identificar dinámicas o tendencias como la evolución en el tiempo de las publicaciones, quiénes son los autores principales, los países e instituciones que mayor interés presentan por este tema y cuáles son las aplicaciones más importantes a las que se orientan los trabajos de investigación.

En la cuadro 5, se presenta el listado de indicadores cienciométricos que se emplean para definir las tendencias en la actividad científica e inventiva en un determinado sector del conocimiento.

Cuadro 5. Indicadores cienciométricos para artículos y patentes.

Vigilancia tecnológica: indicadores cienciométricos		
Tipo de revisión	Actividad científica	Actividad inventiva
Tipo de documento	artículos científicos	Patentes
Bases de datos	Bases de datos tipo referenciales y de texto	Bases de datos de Patentes
Estructurar la ecuación de búsqueda	Palabras clave, buscar en los <i>keywords</i> , título y <i>abstract</i> del artículo, período de consulta	Palabras clave, buscar en el título, <i>abstract</i> , <i>claims</i> del documento de patente
Número de documentos	Número de artículos	Número de patentes
Dinámica de publicaciones	Número de artículos por años	Número de patentes por años
Autores	Investigadores más importantes en el tema	Inventores más importantes

¹ Aunque podría emplearse minería de datos, en este caso la unidad de tratamiento no es en si el dato, sino “el texto” tomado como dato. En la minería de textos los términos del texto son tratados como valores o datos posibilitando su análisis estadístico o cienciométrico.

Continuación cuadro 5.

Afiliación por país	Países donde se encuentran trabajando los investigadores	Países donde se registra la invención
Afiliaciones por institución	Organizaciones de tipo académico, privadas, gubernamentales, públicas	Empresas aplicantes de las patentes (usuarios finales de las invenciones)
En qué tema	Área de conocimiento en la cual tiene su aplicación el trabajo de investigación.	Definida por el IPC (Clasificación Internacional de patentes).
Dónde se publica	Revistas científicas	Oficinas de patentes donde se registra la invención

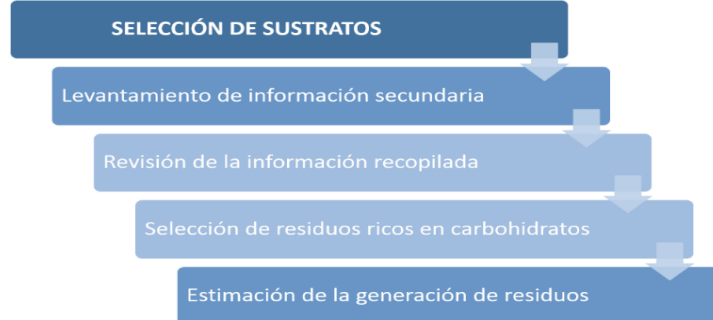
Fuente: Unidad de Bibliometría – USTABUCA.

5.2 SELECCIÓN DE SUSTRATOS

La selección de la biomasa en Santander se tomó de acuerdo a la información de producción agrícola y pecuaria reportados en la Encuesta Nacional Agropecuaria (2015) y el censo nacional agropecuario (2014) por el departamento administrativo nacional de estadística DANE y los reportes de la cámara de comercio de Bucaramanga - Sector Agrícola Santander (2013), de estos reportes se consideraron solo los cultivos permanentes de mayor producción anual.

Además para la selección de sustratos se hizo la recopilación de la información de la biomasa residual generada en Santander con contenidos ricos en hidratos de carbono que pueden ser utilizados en procesos de codigestión para la producción de biohidrógeno, se tuvo en cuenta la disponibilidad, el origen animal o vegetal, la composición lignocelulósica y la humedad, tal como se muestra en la metodología que se expone en la figura 5, los datos se tomaron de estudios nacionales e internacionales de la biomasa y se calcularon a través de promedios estadísticos manejados con hojas de cálculo excel.

Figura 5. Metodología para la selección de sustrato.



Fuente: Propia

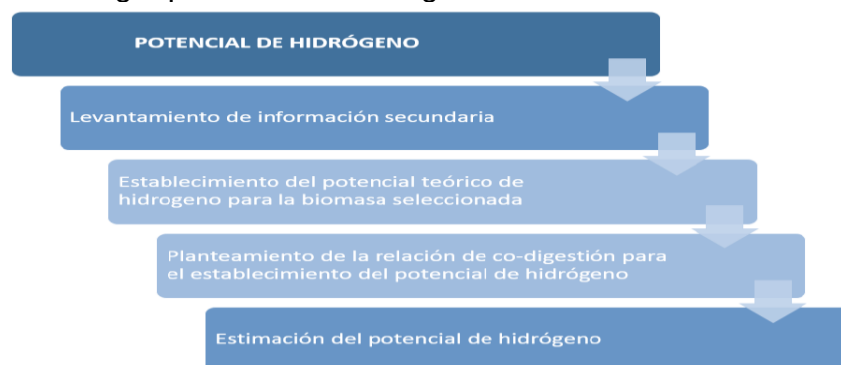
5.2.1. Estimación de la generación de residuos. Para la generación de residuos se determinó a partir de la producción agrícola y pecuaria seleccionada presente en Santander, las fuentes de información consultadas fueron Cuenta satélite piloto de la agroindustria (2012), la encuesta nacional agropecuaria ENA Santander (2013) del departamento administrativo nacional de estadística DANE y la dirección de metodología y producción estadística DIMPE, Instituto Colombiano Agropecuario ICA, Censo Pecuario Nacional 2016, FEDEPALMA La Palma de Aceite en Colombia (2016) y textos científicos de aprovechamiento de la biomasa citados.

El residuo se calculó en kilogramos teniendo en cuenta la producción por tonelada al año para la biomasa de origen vegetal y para la biomasa de origen animal se calculó en kilogramos teniendo en cuenta la generación diaria por cabeza al año. Ambas se obtuvieron de datos obtenidos de diferentes estudios a nivel nacional e internacional.

5.3 POTENCIAL DE HIDRÓGENO

Para la determinación del potencial de hidrógeno, se construyeron cuadros comparativos con datos obtenidos en los diferentes estudios científicos citados.

Figura 6. Metodología potencial de hidrógeno



Fuente: Propia

5.3.1 Estimación del potencial de hidrógeno. Para la evaluación del potencial de hidrógeno se tuvo en cuenta la composición química (porcentaje de celulosa y hemicelulosa) de cada residuo seleccionado, para la identificación de las características fisicoquímicas seleccionas componente lignocelulósico y humedad se estudió y rescato de investigaciones y reportes nacionales e internacionales citados y se realizó un promedio estadístico mediante hoja de excel.

Los cálculos estequiométricos (Anexos 1, 2, 3 y 4) se realizaron basados en una tonelada de residuo, se calculó la producción de hidrógeno por dos rutas vía ácido acético y ácido butírico, la cuantificación realizada se hizo en términos de rendimiento “la cantidad de hidrógeno producido por cantidad de sustrato consumido” y se expresó en unidades de mol H₂/mol de glucosa.

$$\begin{aligned} \text{Base 1 tonelada} &= 1000 \text{ kg} \rightarrow \% \text{ celulosa} \\ \text{Kg de glucosa} &= \% \text{ Celulosa} * \text{PM glucosa} / \text{PM celulosa} \\ \text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6 + 2\text{H}_2\text{O} &\rightarrow 2\text{CH}_3\text{COOH} + 4\text{H}_2 + 2\text{CO}_2 \\ \text{Los kmol glucosa} &= \text{kg glucosa} / \text{PM glucosa} \end{aligned}$$

5.3.2 Rendimiento total de hidrógeno en el residuo de la biomasa seleccionada. Se tomó la cantidad de residuo generada por la cantidad de rendimiento total de hidrógeno calculado por estequiometria en Santander para cada biomasa.

$$\text{Rendimiento Total} = \text{Residuo Generado Santander} * \text{Rendimiento Total Hidrógeno}$$

Por su parte, el potencial energético se calculó de acuerdo al valor del potencial energético la exergía química estándar del hidrógeno se reportan resultados por peso de hidrógeno de 238,490 kJ/kmol ⁸⁷ en (kJ/ton de residuo), se determinó a partir del potencial de biohidrógeno de todas las biomasas obteniendo la energía bruta de acuerdo a los valores de rendimiento estequiométrico.

6. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

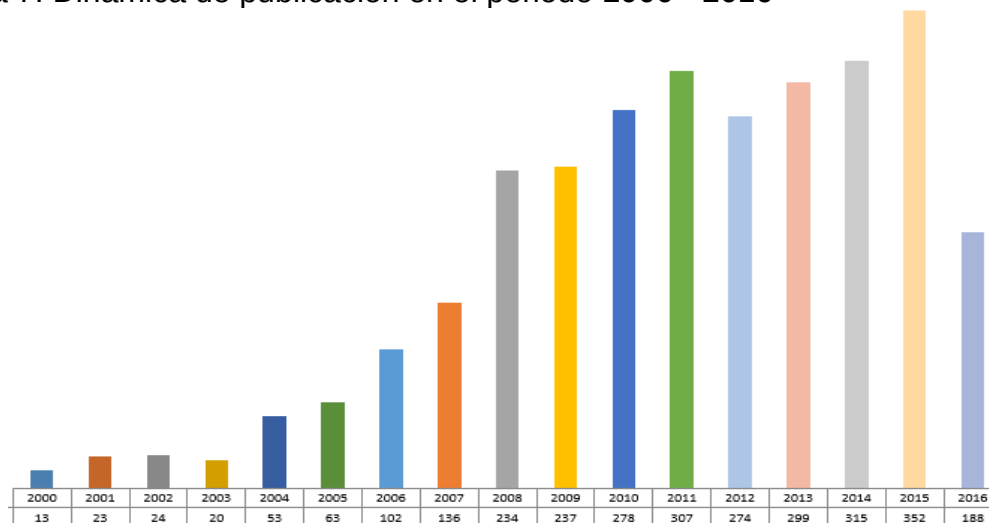
6.1 VIGILANCIA TECNOLÓGICA

Con las palabras claves propuestas se estructuró una ecuación de búsqueda con la cual se realizó el ejercicio de vigilancia tecnológica (análisis cienciométrico) con el fin de identificar las tendencias de investigación en la producción de biohidrógeno a partir de sustratos disponibles en el departamento de Santander. En este caso se obtuvieron 2979 registros correspondientes a artículos científicos indexados en la base de datos de Scopus durante el período 2000 – 2016 (a la fecha).

6.1.1. Indicadores cienciométricos

6.1.1.1 Dinámica de publicaciones por año. El estudio bibliométrico realizado de la producción de biohidrógeno a partir de biomasa residual mediante digestión anaerobia fue en un periodo de observación comprendido entre 2000 y septiembre de 2016, presentando un comportamiento creciente como se muestra en la figura 7 donde se presentan hasta 300 publicaciones por año. Esta implantación creciente para la producción de hidrógeno se ha convertido en un tema de interés en los últimos 8 años debido a la consideración de este, como uno de los principales insumos de la industria petrolera, en refinerías, en el sector del transporte debido a su uso como combustible, en celdas con electrolitos sólidos y a que constituye una opción ambientalmente más sostenible.

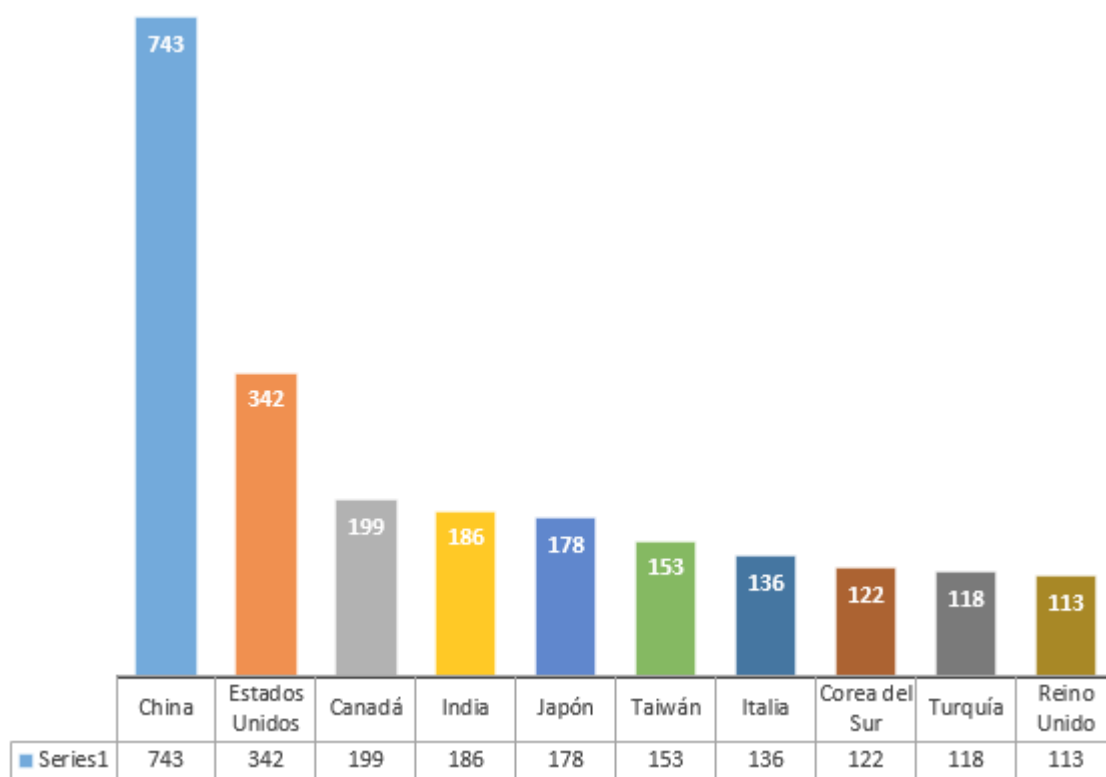
Figura 7. Dinámica de publicación en el periodo 2000 - 2016



Fuente: Unidad de Bibliometría - USTABUCA, cálculos basados en información de Scopus (Elsevier, 2016), procesados con VantagePoint (Versión 9.0, *Search Technology*). Fecha de consulta: 15/07/2016

6.1.1.2 Dinámica de publicaciones por países. En la figura 8 se muestran las tendencias mundiales en investigación de artículos científicos de investigación publicados en revistas internacionales que se encuentran en la base de datos de scopus. La concentración geográfica de las publicaciones científicas son en países desarrollados según el banco mundial en su reporte de 2013 se destaca China con 743 publicaciones y Estados Unidos quien presenta 342; esta tendencia radica en el impulso de estos países por las energías renovables y aprovechar la energía a partir de biomasa.

Figura 8. Dinámica de publicaciones por países



Fuente: Unidad de Bibliometría - USTABUCA, cálculos basados en información de Scopus (Elsevier, 2016), procesados con VantagePoint (Versión 9.0, Search Technology). Fecha de consulta: 15/07/2016

Esta panorámica de desarrollo de la energía del H₂ en el ámbito latinoamericano revela que se está en una etapa incipiente y bastante distanciada de los países punteros en el ámbito mundial como se muestra en la figura 8 como China, Estados Unidos, Japón, Canadá, India; entre otros, están llevando adelante ambiciosos programas de investigación y desarrollo. En este contexto de un total de 73 países mostrados en la base de datos de scopus con publicaciones para la producción de hidrógeno en América Latina solo el 12,33% presentan publicaciones.

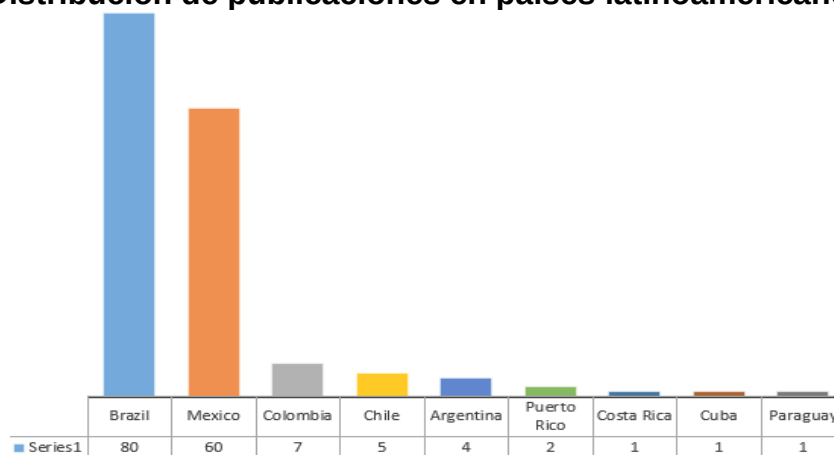
En América Latina según la figura 9 tienen participación en el desarrollo de tecnologías de hidrógeno países como Brasil el cual se constituye como líder en programas de investigación y desarrollo, dentro de ellos se destaca el Programa de Ciencia, Tecnología e Innovación para la Economía del Hidrógeno (ProH₂), la mayoría de investigaciones y proyectos demostrativos la adelantan en cinco redes cooperativas con participación de universidades y centros de investigación.

En orden de importancia según los registros de scopus México constituye el país que ha avanzado hacia la economía del H₂, dentro de sus acciones principales se ubica la Red Nacional del Hidrógeno, asociación civil sin fines de lucro, que propicia la investigación y desarrollo de proyectos para producción de biogás e H₂.

En general dentro de las iniciativas colaborativas se encuentran la “Red Iberoamericana de Pilas de Combustible e Hidrógeno”, creada en el año 2005 y la “Red Iberoamericana Hidrógeno: producción y purificación; almacenamiento y transporte”, en el año 2007, ésta última con la participación de más de 200 investigadores de 11 países de la región; ambas iniciativas patrocinadas por la cooperación española. Finalmente en referencia a las asociaciones orientadas al fomento de la energía del H₂, pueden nombrarse la Asociación Argentina del Hidrógeno, la Sociedad Mexicana del Hidrógeno y la Asociación Colombiana del Hidrógeno.

Cabe destacar que algunas publicaciones se realizaron con cooperación de universidades externas a Latinoamérica como se muestra en la figura 9, tal es el caso de Brasil quien tuvo una cooperación de 6 publicaciones con Canadá y 1 con Estados Unidos; por otra parte México comparte publicaciones con Chile, Colombia, Italia, India, Taiwán, Canadá y Estados Unidos.

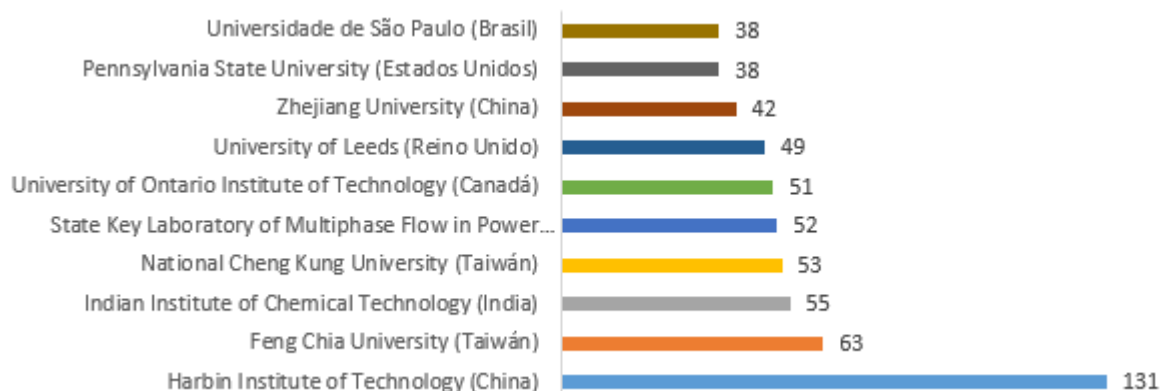
Figura 9. Distribución de publicaciones en países latinoamericanos



Fuente: Unidad de Bibliometría - USTABUCA, cálculos basados en información de Scopus (Elsevier, 2016), procesados con VantagePoint (Versión 9.0, *Search Technology*). Fecha de consulta: 15/07/2016

6.1.1.3 Dinámica de publicaciones por instituciones. En la figura 10 se resume el comparativo para el ámbito mundial, se tomaron las instituciones por país que presentan 5 o más registros, de ahí que China y Taiwán son los países que sobresalen con cerca de 131 y 63 publicaciones.

Figura 10. Dinámica de publicaciones por instituciones



Fuente: Unidad de Bibliometría - USTABUCA, cálculos basados en información de Scopus (Elsevier, 2016), procesados con VantagePoint (Versión 9.0, *Search Technology*). Fecha de consulta: 15/07/2016

En el caso de China tres instituciones con 225 publicaciones:

1. **Harbin Institute of Technology** (131), es una universidad pública nacional clave para el gobierno Chino, esta universidad cuenta con 10 escuelas y dentro de ellas la escuela de ingeniería ambiental y municipal ha estado persiguiendo una investigación muy activa, ha tenido logros significativos en las siguientes áreas: recursos hídricos urbanos, el consumo de aseguramiento de la calidad del agua, tratamiento de aguas residuales y Biotecnología, Química ambiental, control de la contaminación del aire, etc. Esta escuela cuenta con tres centros de investigación; el centro de investigación para el medio ambiente y la biotecnología realiza investigaciones principalmente en: tratamiento de aguas residuales, la ingeniería de la fermentación, la ecología fisiológica y la ecología molecular de microorganismos, etc., incluyendo los estudios aplicados: la tecnología de producción de biohidrógeno a partir de hidratos de carbono de agua residual, tecnología avanzada de las aguas residuales para la eliminación biológica de sulfatos (BSR), desarrollo y la aplicación de floculantes microbianas compuestos (MBF), etc.
2. **State Key Laboratory of Multiphase Flow in Power Engineering** (52), este es un laboratorio Estatal cuyo enfoque ha mostrado avances claves como resultados más fructíferos en la teoría original de disciplinas de flujo multifásico y la investigación aplicada; principales tareas de investigación

nacionales para el soporte de equipo de alto nivel de investigación y soporte de plataformas, sistemas de flujo multifásico para la energía térmica grande, el flujo multifásico ingeniería de petróleo, fuentes de energía renovables y alternativas, procesos y sistemas de ahorro de energía y de alta tecnología, la recolección de petróleo y gas de ahorro de energía y el transporte de conservación de la energía y la seguridad, eficacia alta y baja la tecnología de transferencia de calor de barrera de gas, combustibles alternativos limpios y gas natural mezclado con motor de combustión de hidrógeno de baja contaminación, el uso de la escala de producción de hidrógeno. A este laboratorio se encuentra asociado el Centro de Investigación Internacional para la Energía Renovable (IRCIRE) dentro de los estudios que se destacan en este centro son las energías renovables como la energía solar y la energía de la biomasa, la producción en masa y el uso de la energía del hidrógeno.

3. **Zhejiang University** (42), es una universidad pública abarca 12 disciplinas académicas: la agricultura, el arte, la economía, la educación, la ingeniería, la historia, el derecho, la literatura, la gestión, la medicina, las ciencias naturales y la filosofía. La facultad de ingeniería cuenta con el Departamento de Energía de Ingeniería, el doctor Wang Zhihua es un profesor asociado con 5 publicaciones sobre producción hidrógeno y una patente.

Para Taiwán se presenta dos instituciones con 116 publicaciones:

1. **Feng Chia University** (63), es una universidad privada cuenta con 32 centros de investigación, dentro de los que se encuentra El Centro de Desarrollo de Energía Verde (GEDC), se basa en el desarrollo de la investigación energética, ahorro de energía, el reciclaje de recursos, y la formación personal en la ciencia y la tecnología. Los temas principales de la investigación son la producción de biohidrógeno con las tecnologías: anaeróbica, alta tasa de biorreactor de tres fases, la tecnología de biología molecular, y plantas piloto. Sobre la base de las tecnologías clave establecidos, la GEDC lidera la tasa de producción de biohidrógeno en el mundo mediante la construcción de una estación de servicio de Bio H₂ en el campus de la Universidad Feng Chia en 2011. Actualmente la investigación y desarrollo de tecnologías de procesos fermentativos para la energía de biohidrógeno es un proyecto apoyado por el Departamento de Energía, Ministerio de Economía, y utiliza tecnologías tales como la tecnología de células inmovilizadas de selectividad para las células hidrogenasa, inducida granular fermentación de hidrógeno celular, y la preparación de materiales electrocrómicos por deposiciones químicas; de estas investigaciones 8 se han obtenido patentes de Taiwán, China y EE.UU.; 9 se han presentado solicitudes. El GEDC también promueve la cooperación regional mediante la celebración de reuniones internacionales, como la APEC Conferencia de Tecnología avanzada de Biohidrógeno y el curso de

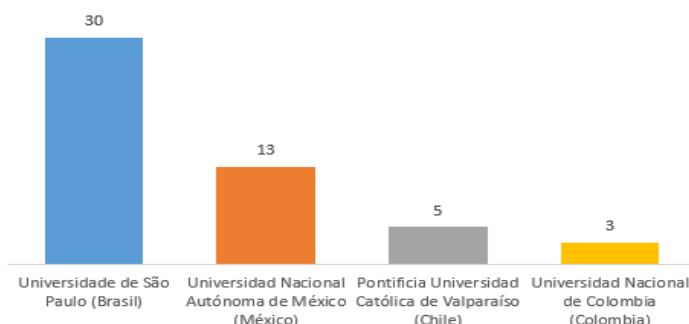
formación a corto plazo, el Simposio asiático de Biohidrógeno. El GEDC está actualmente redes con varios institutos de investigación.

2. **National Cheng Kung University** (53), es una universidad pública, cuenta con 9 facultades y 54 centros de investigación, dentro de los que se halla el centro de investigación de medio ambiente sostenible que dentro de sus líneas de investigación se halla la producción de biohidrógeno, el tratamiento, manejo y conservación del recurso agua.

En el ámbito mundial las instituciones con mayor importancia en términos de sus resultados e impacto de los procesos de investigación en la temática de producción de biohidrógeno se encuentran países como China, Taiwán, India, Canadá, Reino Unido, Estados Unidos y Brasil, muchos de ellos son los mayores consumidores mundiales de energía y los que mayor GEI generan, las instituciones de investigación de prestigio en el ámbito mundial muestra la concentración de las investigaciones en la temática de producción de hidrógeno como alternativa viable e importante económicamente para reemplazar las energías convencionales, costosas y que deterioran el medio ambiente.

En el ámbito latinoamericano de acuerdo con lo que se observa en la figura 11 se destacan 4 universidades siendo la Universidad de Sao Paulo de Brasil la que mayor investigación en el tema ha realizado con 30 publicaciones.

Figura 11. Dinámica de publicaciones por instituciones en Latinoamérica



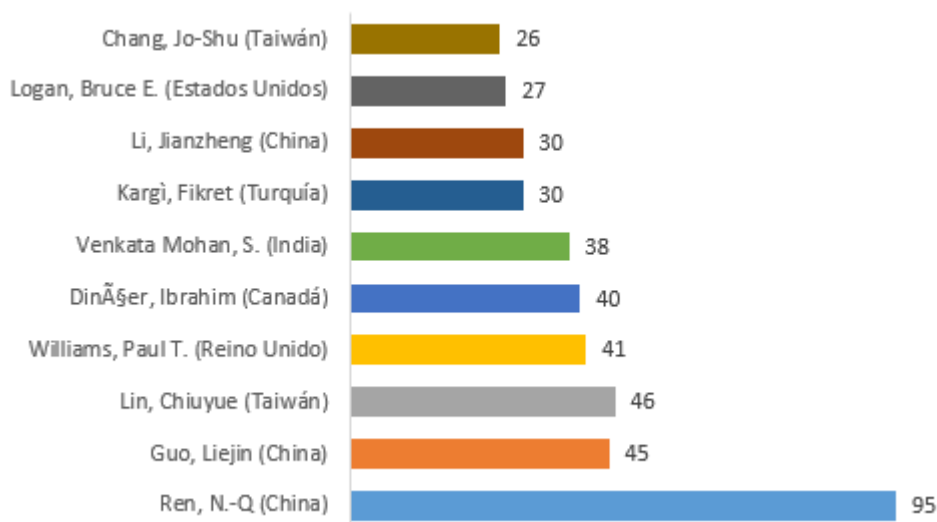
Fuente: Unidad de Bibliometría - USTABUCA, cálculos basados en información de Scopus (Elsevier, 2016), procesados con VantagePoint (Versión 9.0, *Search Technology*). Fecha de consulta: 15/07/2016

A diferencia de la mayoría de los países desarrollados, Brasil tiene una combinación energética con un 45% de energía renovable, este país se configura como un país con gran presencia de combustibles renovables ⁸⁸. El impulso de mercados sostenibles, producidos a partir de fuentes de hidrógeno está siendo liderado por las acciones del Ministerio de Minas y Energía de acuerdo con las características específicas de Brasil, en línea con los esfuerzos internacionales para reducir las

emisiones, dependencia atmosférica y la reducción de los combustibles fósiles. Dentro de los resultados más importantes en Brasil está el primer bus de servicio público movido por hidrógeno, un vehículo que emite cero gases contaminantes, este proyecto fue presentado por el ministerio brasileiro de Minas y Energía, la Empresa Metropolitana de Transportes Urbanos y la Universidad de Sao Paulo a un costo de US\$ 16 MM (R\$ 31MM) que se apoya también en recursos provenientes de los Programas de Desarrollo de las Naciones Unidas.

6.1.1.4 Dinámica de autores. Los registros de autores según el uso de palabras clave se muestra en la figura 12, se puede apreciar que la investigación del doctor Ren, Nan Qi Profesor del Instituto de Tecnología de Harbin, Director del Laboratorio Estatal de Recursos de Agua y Medio Ambiente Urbano, entre sus áreas de investigación se incluyen la tecnología de producción de biohidrógeno, microbio ecología molecular del sistema de bio-tratamiento anaeróbico, proceso de bio-tratamiento de alta resistencia y de difícil degradación orgánica de aguas residuales industriales, contaminantes orgánicos persistentes en el agua, el aire y el suelo. En cuanto a producción científica tiene una participación en 95 documentos de los cuales 55 artículos están asociados a la producción de biohidrógeno del 2007 a la fecha.

Figura 12. Dinámica de autores



Fuente: Unidad de Bibliometría - USTABUCA, cálculos basados en información de Scopus (Elsevier, 2016), procesados con VantagePoint (Versión 9.0, *Search Technology*). Fecha de consulta: 15/07/2016

6.1.1.5 Dinámica de colaboración entre países. La figura 13 nos muestra la matriz de colaboración entre países a nivel mundial; la investigación colaborativa es un hecho que hace que sea mucho más fácil para las instituciones la exploración aplicada en la producción biológica de hidrógeno, en la actualidad los desarrollos tecnológicos asociados al uso del hidrógeno como combustible está siendo liderada por tres regiones del mundo: Estados Unidos, Japón y Europa; los proyectos más interesantes son los liderados por la Unión Europea (UE) ^{77,89}.

Esta matriz muestra que Estados Unidos, Japón y Canadá son los mayores colaboradores en investigación respecto a la producción de hidrógeno, por su parte en Colombia este tipo de colaboración se encuentra vinculada con países como México e Italia; aunque los enfoques, orientaciones, procesos y objetivos que se llevan a cabo en cada país son muy diferentes, se destaca un nombre de investigación común, sugieren varias áreas de interés mutuo para futuras colaboraciones como la demostración y la mejora de la obtención del hidrógeno impulsada bajo condiciones anaeróbicas, un aumento en los rendimientos de fermentación oscura anaerobia de hidrógeno a través de la ingeniería metabólica y otras técnicas moleculares y fisiológicas, integración de sistemas y la inclusión del desarrollo de biorreactor.

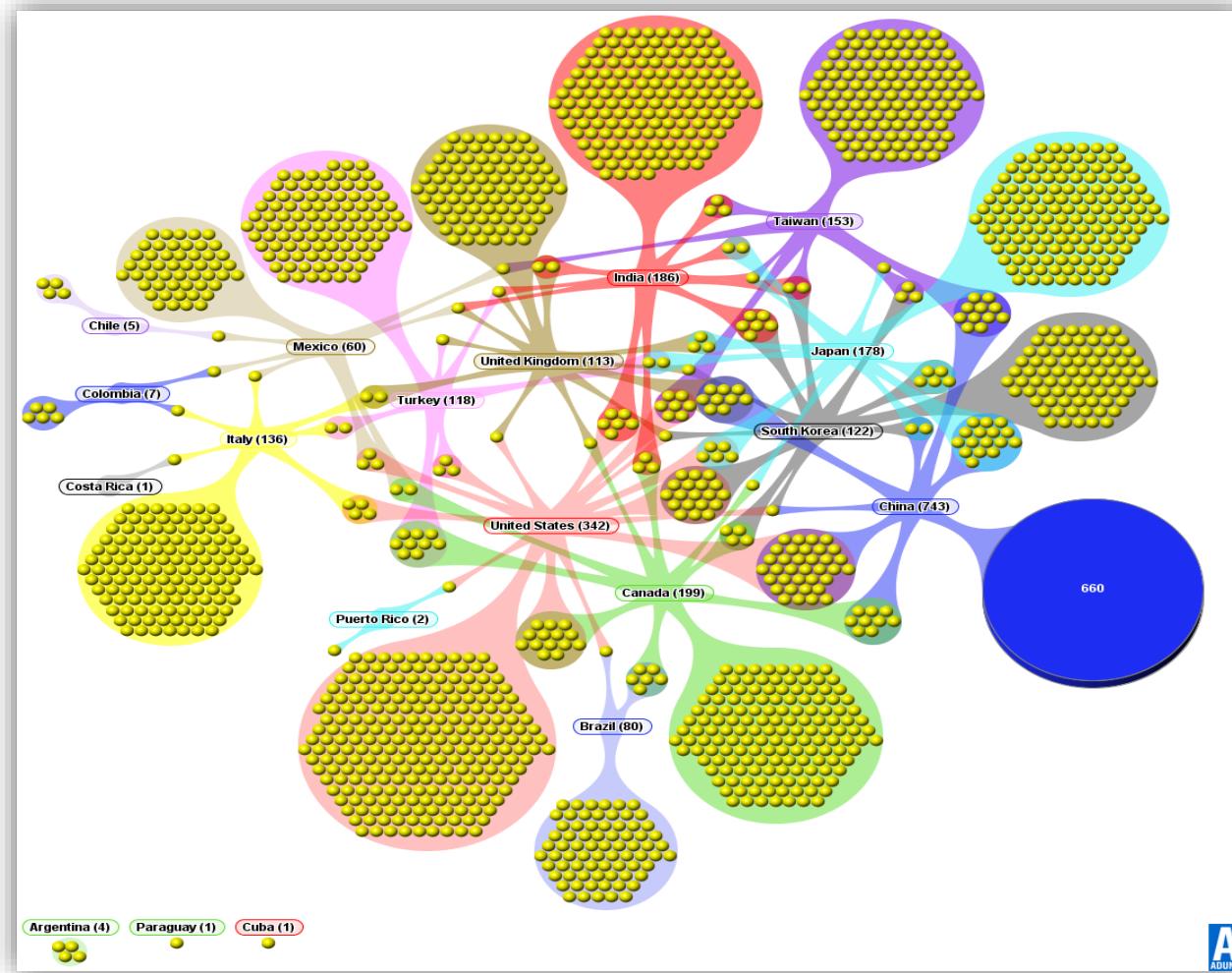
Todas estas investigaciones en todos los países de Latinoamérica y del resto del mundo tienen como justificación común la implementación de tecnologías limpias para producir energía que no genere gases de efecto invernadero, países con problemas energéticos están abordando sus investigaciones a otras fuentes generadoras de energía como el biohidrógeno.

Según la matriz se puede concluir por cantidad de publicaciones existentes las regiones como China, EEUU, Japón han realizado más proyectos en la producción de hidrógeno en comparación con los existentes para América latina, esto muestra la gran diferencia que separa a las regiones según su desarrollo; en los países cuyos gobiernos le han dado alguna relevancia al tema, las diferencias también están claras: Brasil y México con apreciables diferencias con el resto de los países latinoamericanos aunque aún muy lejos también de los países desarrollados.

Este trabajo colaborativo ha permitido impulsar instituciones para la generación de patentes, con la formación de centros de colaboración científica que financian la investigación para mejorar la producción de hidrógeno para su uso en el procesamiento de combustible y la industria química.

El trabajo colaborativo entre países e instituciones permite fomentar el desarrollo de las tecnologías para la producción de hidrógeno como vector energético, y promover su utilización, con el fin de obtener beneficios medioambientales y producción de hidrógeno a partir de otras fuentes de energía como la obtenida en la biomasa residual.

Figura 13. Matriz Trabajo Colaborativo



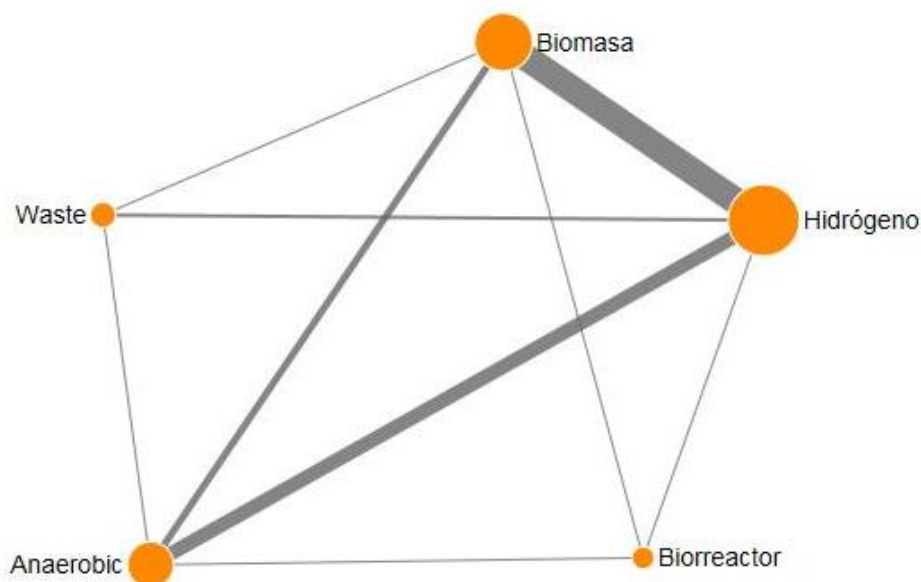
Fuente: Unidad de Bibliometría - USTABUCA, cálculos basados en información de Scopus (Elsevier, 2016), procesados con VantagePoint (Versión 9.0, Search Technology). Fecha de consulta: 15/07/2016

6.1.1.6 Palabras Clave usadas en la producción de biohidrógeno. De los 2979 documentos analizados, en total, se contabilizaron 4378 palabras clave diferentes. Las palabras clave más usadas hidrógeno, biohidrógeno, biomasa, anaeróbico, residuos, biorreactor, fermentación, de las cuales 2314 (52,85%) corresponden a hidrógeno donde se incluyó (biohidrógeno, producción de hidrógeno, fermentación hidrógeno), 1308 (29,87%), 674 (15,39%) corresponden a anaeróbico el cual incluye (digestión anaeróbica, fermentación anaeróbica, reactor anaeróbico), 64 (1,46%) que corresponde a residuos el cual incluye (aceite, agricultura, aguas residuales, fruta, comida, lechería); 25 (1%) que corresponde a biorreactor.

Esto evidencia la variabilidad con el tipo de biomasa residual utilizada de origen animal, vegetal e industrial, limitando la consolidación de proyectos o conocimientos necesarios para el escalado de estos sistemas productores de biohidrógeno.

De acuerdo con lo observado en la figura 14 se evidencia que el uso de palabras clave usadas para la producción de hidrógeno maneja parámetros similares como biomasa, hidrógeno, anaerobio, residuo (waste), biorreactor las cuales fueron definidas para este estudio con el objetivo de tener una cobertura total de todos los procesos involucrados en la producción de biohidrógeno; cabe destacar que dentro de la biomasa residual encontrada en los diferentes estudios que se analizaron, sobresale la que contiene mayor cantidad de hidratos de carbono con altos contenidos de humedad y los procesos metabólicos anaerobios.

Figura 14. Matriz Palabras clave



Fuente: Unidad de Bibliometría - USTABUCA, cálculos basados en información de Scopus (Elsevier, 2016), procesados con VantagePoint (Versión 9.0, *Search Technology*). Fecha de consulta: 15/07/2016

6.1.1.7 Dinámica de investigación del tema en Colombia. En Colombia según el registro de la base de datos de scopus se destaca 7 instituciones de educación superior. Sin embargo, con el fin de abarcar de una forma más completa capacidades nacionales se consultaron en otras bases de datos como SCIENCE@DIRECT y servidores externos como Google Scholar, se evidencia el interés de las instituciones para la producción de hidrógeno, dentro de las universidades más destacadas encontramos:

7. La Universidad Industrial de Santander en el Centro de Investigación Para El Desarrollo Sostenible en Industria y Energía

Artículos

- Evaluación termodinámica de la producción de hidrógeno para células de combustible mediante el uso de vapor bio-reformado de etanol: Efecto de la adición de gas portador. Viatcheslav Kafarov, Liliana Hernández
- Proceso de integración de bioetanol a partir de caña de azúcar y la producción de hidrógeno. Viatcheslav Kafarov, Liliana Cristina Hernández Bello

Libros

- Producción de hidrógeno a partir de bioetanol. Viatcheslav Kafarov
- Producción y Purificación de Hidrógeno a Partir de Bioetanol y su Aplicación en Pilas de Combustible. Abello, M., Aguirre, P., Amadeo, N., Bussi, J., Corti, H., Suarez, E. G., & Rodrigues, A.

8. La Universidad Nacional de Colombia sede Palmira, con 3 publicaciones pertenecientes a los grupos de investigación Prospectiva Ambiental liderado por la doctora Luz Estela Cadavid Rodríguez y Grupo de investigación en tecnologías avanzadas para la revalorización de subproductos agroindustriales liderado por el Dr. Dorian Prato García.

Artículos:

- Estudio del potencial de un residuo agroindustrial para la producción biológica de hidrógeno a escala laboratorio Dr. Dorian Prato García
- Evaluación del potencial de tres azúcares simples para la producción hidrógeno por vía fermentativa, Dr. Dorian Prato García
- Aprovechamiento de biomasa residual agropecuaria y urbana a través de digestión anaerobia. Luz Estela Cadavid Rodríguez

9. La Universidad de los Andes en el centro de investigaciones en ingeniería ambiental CIIA por el doctor Mario Andrés Hernández Pardo:

Artículos

- La producción de hidrógeno mediante la digestión anaerobia de estiércol de cerdo: efecto de las condiciones de operación

- El uso de mucílago de café como un nuevo sustrato para la producción de hidrógeno en codigestión anaerobia con estiércol de cerdo

10. **La Universidades Santo Tomás** de Bogotá:

Artículos:

- Evaluación de la producción de hidrógeno empleando cepas nativas de *clostridium spp* a partir de glicerol como fuente de carbono por el doctor Dionisio Humberto Malagón Romero

11. **La Universidad Pontificia Bolivariana** sede Medellín del instituto de energía y termodinámica

Artículos:

- Simulación de la producción de hidrógeno y metanol a partir de la gasificación de cascarilla de arroz con vapor

12. **La Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia** en el Grupo de Investigación y Desarrollo en Planeación y Operación del Transporte GIDPOT con los investigadores Julián Rodrigo Quintero González y Diana Carolina Nova Barón.

Artículos:

- “El hidrógeno como combustible alternativo en la producción de energía y su implementación en el transporte vehicular”

Del contexto anterior se evidencia que a nivel nacional la red de trabajo colaborativo frente al tema entre las diferentes universidades es bajo, contrario al tema de cooperación a nivel internacional mostrado en la matriz de la figura 11.

6.2 BIOMASA RESIDUAL CON CARACTERÍSTICAS ADECUADAS PARA LA PRODUCCIÓN DE HIDRÓGENO

6.2.1 Biomasa residual con características adecuadas para la producción de hidrógeno. El rendimiento de hidrógeno está relacionado con el contenido de hidrógeno o celulosa de la biomasa, en estudios realizados con diferentes tipos de biomasa residual como la cáscara de almendra, cáscara de girasol, cáscara de algodón, cáscara de avellana y de nuez con contenidos de celulosa e hidrógeno variables se pudo evidenciar la producción de hidrógeno generado, la técnica usada fue la de gasificación en agua supercrítica, bajo los parámetros de presión 23–48 MPa y temperatura 650 -750 K^{90,91}.

El efecto de los tres principales componentes de la biomasa (celulosa, hemicelulosa y lignina), la presencia de celulosa da el mayor rendimiento de hidrógeno un 65%,

en comparación con el obtenido de la lignina con un 25% mediante gasificación de agua supercrítica ⁹¹.

En general, las características de los residuos agroindustriales son muy variadas, dependen de la materia prima y del proceso que los generó, no obstante, comparten una característica principal que es el contenido de materia orgánica, constituida por celulosa, lignina, hemicelulosa y pectina ⁹².

Por otra parte la materia prima para producir biohidrógeno es biomasa residual con alto contenido en humedad mayor o igual al 60% presentado en el cuadro 3 de procesos de transformación de la biomasa de acuerdo a su humedad, especialmente purines ganaderos y lodos de depuradoras de aguas residuales urbanas ⁹³.

6.2.2 Relación C/N (carbono – nitrógeno). Azúcares, almidones, proteínas, celulosa, hemicelulosa, lignina, etc. son los principales componentes de materia orgánica, químicamente forma cadenas de carbono (C) de longitud y peso variables, los azúcares poseen menor longitud y peso en sus cadenas carbonadas en comparación con las ligninas.

La descomposición de la materia orgánica depende del tamaño de las cadenas de carbono, mientras menor sea el tamaño de la cadena de C, mayor es la facilidad para su descomposición; la celulosa y ligninas contienen mayor tamaño en las cadenas de carbono y son de lenta y demorada descomposición. Para los procesos de descomposición son los microorganismos que hidrolizan estas cadenas de C para dividir las y liberar los nutrientes, para lo cual requieren nitrógeno (N); los requerimientos de (N) varían para cada especie de microorganismos pero en general se requiere 1 parte de (N) por cada 30 partes de (C) que tengan que ser hidrolizados.

La condición química del material determina la relación C/N y por lo tanto la velocidad de su descomposición. La relación ideal entre el C y el N (C:N) para cualquier material orgánico, o mezcla de éstos, se ubica entre 25:1 y 35:1; índices de esta naturaleza son indicadores de una rápida y eficiente descomposición. Cuando el valor en la relación C/N es más alto igual o superior a 35, la velocidad de descomposición es lenta; cuando el valor está por debajo de 25, se pierde N por volatilización (en forma de amoníaco NH_3) ^{94,95}.

De acuerdo a lo observado en la tabla 1 los valores más altos en la relación C/N están representados en la biomasa residual de origen vegetal la cual tienen un porcentaje de compuestos lignocelulósicos comparados con los presentes en la biomasa de origen animal. Esta relación se puede observar en la tabla 1, según la composición química representada en los residuos donde se hallan diferentes tipos de biomasa vegetal, la presencia de C se representa en valores superiores al 38 % en peso de biomasa sin humedad, en cuanto la relación C/N los valores más altos

son los de la corteza de madera dura con 457,72% de la relación C/N, biomasa cuya morfología de fibras depende principalmente de la composición y la organización estructural de la pared celular de fibras de plantas compuestas de celulosa, hemicelulosa y lignina.

Tabla 1. Composición de algunos materiales orgánicos

Material	Nitrógeno (% de materia seca)	Relación C/N
Orines	15 – 18	0.8
Sangre	10 – 14	3.0
Bovinaza	1.7	18
Gallinaza	6.3	15
Porquinaza	3.8	38
Equinaza	2.3	25
Cortes de prado	3 – 6	12 – 15
Tamo de trigo	0.3 – 0.5	128 – 150
Viruta de madera	0.1	200 – 500

Fuente: Abonos orgánicos, ASCAM

Es importante establecer que a mayor cantidad de compuestos lignocelulósicos en la materia orgánica se tiende a generar una alta relación C/N para la biomasa residual, principalmente en aquella de origen vegetal.

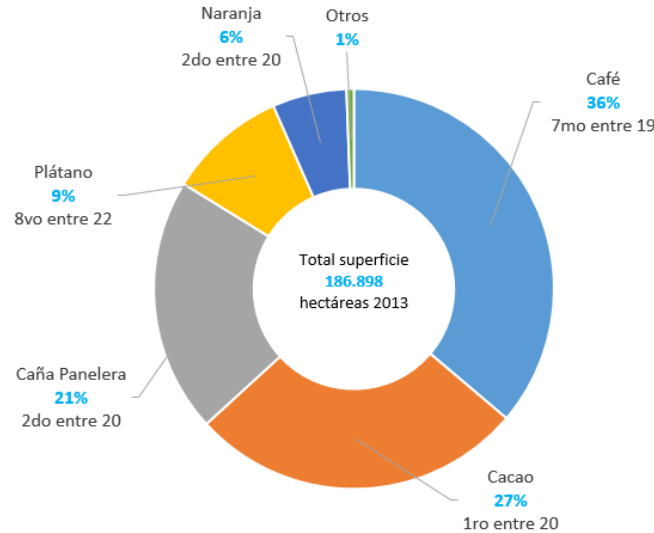
6.3 BIOMASA RESIDUAL EN SANTANDER

La Encuesta Nacional Agropecuaria realizada por el DANE y aplicada en 22 departamentos, muestra que el país alcanzó el año anterior 2,9 millones de hectáreas para uso agrícola y 30 millones para pecuario⁹⁶. Esta actividad en Santander tiene en el Producto Interno Bruto una participación de 7,2% y ocupa el cuarto puesto en orden de importancia en el país. Su producción se desarrolla en aproximadamente 2,1 millones de hectáreas, en donde el rubro pecuario tiene la mayor proporción de uso del suelo con el 78,7%, respondiendo con ello al gran inventario de cabezas de ganado vacuno existente que supera los 1,4 millones, y que lo sitúa en el sexto lugar por departamentos. De los 87 municipios del Departamento 78 de ellos basan sus actividades en el Sector Agropecuario.

La producción agrícola se realiza en 220 mil hectáreas, con mayor superficie dedicada a cultivos permanentes 186,898 hectáreas, en donde sobresale el café, cacao y caña panelera como se muestra en la figura 15 de la distribución de áreas sembradas las actividades agropecuarias más importantes en la región que según la secretaria de agricultura se basa en un nuevo enfoque de desarrollo integral, para hacer del campo santandereano un sector competitivo, eje fundamental para el crecimiento económico y social de sus comunidades, que bajo principios de cooperación, participación, equidad y solidaridad genere empleo productivo

sostenible integrando así la utilización de todos los subproductos generados para cada actividad.

Figura 15. Cultivos permanentes en Santander-Distribución en áreas sembradas



Fuente. Cámara de comercio Bucaramanga ⁹⁷

6.3.1 Estimación de la generación de residuos. De los cultivos permanentes para Santander los que mayor biomasa residual generan con condiciones apropiadas para la producción de biohidrógeno según su contenido de humedad y carbohidratos son los cultivos permanentes como la caña de azúcar, el cacao, el café, la palma de aceite, y según su uso de suelos en actividades agropecuarias correspondientes al sector avícola, porcícola, caprino y bovino; la producción de cada una de estas actividades de acuerdo a los datos obtenidos de los últimos reportes del **DANE** y la cámara de comercio de Bucaramanga se muestra en las tablas 2 y 3.

Tabla 2. Producción de cultivos agrícolas en Santander

Cultivo	Producción Santander ton/año
Caña de azúcar	142.595
Cacao	10.007
Café	26.481
Palma de aceite	1.229.634

Fuente: Resultados DANE Departamento de Santander ^{96,98}

Tabla 3. Producción pecuaria en Santander

Actividad pecuaria	Producción Santander cabezas/año
Sector bovino	1.412.313
Sector caprino	61.783
Sector avícola	37.010.107
Sector porcino	74.680

Fuente: Censo Pecuario Nacional 2016 ⁹⁹

La palma de aceite es uno de los cultivos permanentes más abundantes, es considerada la oleaginosa más productiva del planeta; el fin principal de este cultivo es la producción de aceite donde Colombia se ubica como el cuarto productor en el mundo y el primero en América según registros de fedepalma, en Santander en 2016, 74,520 hectáreas corresponden a palma de aceite. La Zona de los Santanderes cuenta con el Campo Experimental Palmar de La Vizcaína, ubicado en el municipio de Barrancabermeja ¹⁰⁰, con el fin de acercar la investigación y la extensión a los productores de la zona, durante el proceso de extracción de los aceites de palma se obtienen diferentes subproductos que pueden aprovecharse de diversas formas como tusas vacías, aguas lodosas y cuesco que pueden generar recursos económicos importantes en la región.

En cuanto a la producción pecuaria el sector avícola es una de las actividades más importantes, de acuerdo con el reporte de la Federación Nacional de Avicultores, Fenavi, al cierre del primer semestre de 2016, el sector presentó un crecimiento de 4,9%, lo que le ha permitido consolidarse dentro de la estructura actual de la economía colombiana y de manera particular en la estructura económica del departamento de Santander ¹⁰¹, su producción contemplan varias alternativas como las aves, los huevos, carnes frías y como subproducto pecuario la gallinaza que se han utilizado en preparación de alimentos para rumiantes y para elaboración de compostaje, este presenta proteínas, fosforo, calcio y otros minerales además de elementos orgánicos, y particularmente las deyecciones que se obtienen de las gallinas en jaulas tienen mayor concentración de nitrógeno lo que favorece procesos de codigestión debido a que ayudan a descomponer más fácilmente compuestos orgánicos.

Tabla 4. Cantidad de biomasa residual generada para cada residuo por tonelada de cultivo.

Biomasa	Cantidad de residuo	Ref.
Bagazo de Palma de aceite	180 kg/ton	102-107
Bagazo Caña de azúcar	250 kg/ton	108-113
Mucilago de Cacao	40,28 kg/ton	114
Mucilago de Café	64 kg/ton	41,115-118
Caprinaza	2 kg/día/cab	119,120
Gallinaza	0,1 kg/día/cab	13,121,122
Porcinaza	3 kg/día/cab	28,123
Bovinaza	30 kg/día/cab	124-126

Fuente: Propia

Las diversas fuentes de producción agrícola y pecuaria generan residuos, en la tabla 4 se presenta la cantidad de la biomasa residual seleccionada para este estudio del departamento de Santander. Por ejemplo el bagazo de caña de azúcar puede llegar a producir 250 kg/ton que corresponde al 25% de su producción, mientras que para

aquel de origen animal como el obtenido por la bovinaza produce 30 kg/día por cabeza correspondiente a un 100% de su producción. Así mismo los demás cultivos generan materia prima que puede convertirse en la producción de bioenergías teniendo en cuenta la disponibilidad de los residuos de cultivo y residuos pecuarios.

6.3.2 Selección de residuos ricos en carbohidratos. Para la selección de residuos se tuvo en cuenta diferentes criterios dentro de ellos que el proceso para la obtención del biohidrógeno pueda ser sostenible, para ello se debe considerar sustratos a partir de fuentes renovables abundantes que su principal componente pueda ser utilizado como sustrato para procesos de digestión anaerobia, en este sentido los carbohidratos han sido los sustratos fermentables más estudiados, la composición química de la biomasa residual contiene gran cantidad de azúcares en su contenido lignocelulósico.

Los mayores constituyentes lignocelulósicos según la literatura analizada son la celulosa, hemicelulosa y lignina, las fracciones más importantes son la hemicelulosa (15 al 30 % del peso seco del material) y la celulosa (35 al 50 % del peso seco del material)¹²⁷.

Existe gran variedad de sustratos provenientes de recursos renovables como los azúcares contenidos en productos agrícolas, en Santander la biomasa seleccionada puede ser sometida a extracciones para recuperar biohidrógeno, puesto que cuenta con la presencia de contenidos importantes de celulosa, hemicelulosa y humedad, en la tabla 5 y la figura 16 están representados en promedio de porcentaje de peso seco según estudios reportados a nivel nacional e internacional.

Se debe tener en cuenta que la composición de la biomasa residual para efectos de cantidad de compuestos, los datos que se muestran en la tabla, no pueden tomarse como exactos debido a que la composición fisicoquímica de cada residuo está influenciada por los métodos de análisis, su origen biológico, la clase de material vegetal, el tipo de suelo, el clima en que se cultivan, los fertilizantes utilizados, la época del año en que se toman las muestras, el tipo de alimentación de los animales, etc.

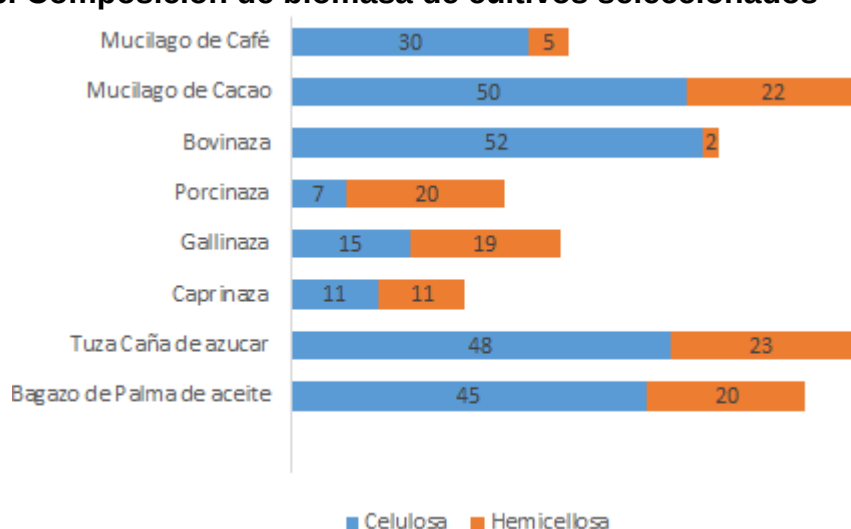
Estos sustratos para la generación de biohidrógeno generalmente requieren pretratamientos a causa de que sus propiedades los hacen resistentes a la degradación enzimática, el mejor método y condiciones de pretratamiento dependen del tipo de material lignocelulósico. Existen pretratamientos de tipo químico, térmico, físico, fisicoquímico, etc. que permiten acceder principalmente a la celulosa la cual por su composición química es el producto más rápido para hidrolizarse y producir hidrógeno, además que las proporciones halladas en las diferentes biomásas son las más abundantes.

Tabla 5. Composición de biomasa de cultivos seleccionados de Santander

Biomasa	Porcentaje en peso seco			Ref.
	Celulosa	Hemicelulosa	Humedad	
Bagazo de palma de aceite	43	22	30	102-107
Bagazo caña de azúcar	48	23	40	108-113
Mucilago de cacao	50	22	84	114
Mucilago de café	30	5	87	41,115-118
Caprinaza	11	11	65	119,120
Gallinaza	15	19	72	13,121,122
Porcinaza	7	20	72	28,123
Bovinaza	52	2	80	124-126

Fuente: Propia

Figura 16. Composición de biomasa de cultivos seleccionados



Fuente: Propia

Los rendimientos para la producción de biohidrógeno también están asociados a la composición de la biomasa, para los residuos seleccionados la fracción de hemicelulosa y celulosa es variable, se destacan biomasa con contenidos lignocelulósicos altos como el mucilago de cacao con un 72%, bagazo de caña de azúcar con 71% y bagazo de palma de aceite con un 65%, porcentajes que indican que este tipo de biomasa son óptimas para la obtención de biohidrógeno ²⁶.

Es importante mencionar que los residuos ganaderos tienen una baja composición lignocelulósica comparada con los residuos de origen vegetal la gallinaza por ejemplo tienen un contenido de un 34%, la porcinaza de un 27% y la caprinaza con un 22% como se evidencia en la figura 16. Los residuos de origen animal tienen una composición rica en proteínas y otros nutrientes que pueden actuar como limitantes en la producción de hidrógeno, sin embargo hay que tener en cuenta que según los estudios cuando hay combinación de residuos ganaderos con residuos

lignocelulósicos de origen vegetal podría ser factible para la producción de biohidrógeno mediante procesos de codigestión anaerobia para la compensación de nutrientes, degradación de carbohidratos y aumento de microorganismos ¹²⁸.

6.4 EVALUACIÓN DEL POTENCIAL TEÓRICO PARA LA PRODUCCIÓN DE BIOHIDRÓGENO

6.4.1 Parámetros a tener en cuenta en los procesos de codigestión anaerobia para la producción de biohidrógeno. Según los estudios abordados en los procesos de producción de biohidrógeno por los diferentes autores, se muestra que se deben tener presentes los siguientes factores:

pH: el potencial de hidrógeno influye en la actividad de las bacterias productoras de hidrógeno puesto que los procesos metabólicos que permiten la degradación de los sustratos necesitan enzimas como la hidrogenasa, estudios con respecto a la influencia de pH en la producción de hidrógeno muestran que el rango óptimo de pH es de 4,5 y 6,0.

Sustrato: estudios de la producción de hidrógeno muestran diferentes tipos de sustratos con grandes cantidades de carbohidratos, y que generalmente son obtenidos de la biomasa residual tanto de origen animal como vegetal, a los que se le pueden realizar pre-tratamientos para la degradación de sustratos difíciles como la acidificación, el congelamiento y descongelamiento, esterilización, etc.

Pretratamientos: Debido a la composición del material lignocelulósico la hidrólisis enzimática de esta biomasa es elevadamente limitada debido a varios factores. Diferentes investigadores concluyen que la cristalinidad de la celulosa es sólo uno de ellos. Otros son el grado de polimerización, contenido de humedad, la superficie de contacto disponible y el contenido de lignina ^{129,130}. Para lograr la hidrólisis de la biomasa lignocelulósica se han propuesto pretratamientos los cuales se pueden clasificar principalmente físicos como: mecánicos y térmicos; y químicos empleando ácidos o bases y la combinación entre estos.

Nutrientes: En los procesos digestivos para producción de hidrógeno compuestos como el nitrógeno, los fosfatos, la carga orgánica derivada de carbohidratos como celulosa, hemicelulosa y lignina son importantes para el crecimiento celular de las bacterias productoras de hidrógeno.

Condiciones de Temperatura: Bajo condiciones termófilas (por encima de los 45°C) para conseguir una mayor velocidad del proceso y una mejor eliminación de organismos patógenos, los rendimientos para la producción de hidrógeno son mayores en comparación con las condiciones mesófilas (entre 25 y 45°C) A medida que aumenta la temperatura, aumenta la velocidad de crecimiento de los microorganismos y se acelera el proceso de digestión dando lugar a mayores producciones de biogás.

Tipo de Reactores: Los dos tipos principales de reactor se denominan por lotes también conocidos como “batch” o “discontinuos” y continuos. De acuerdo al tipo de reactor utilizado se puede decir que los mayores rendimientos se dan bajo reactores tipo lote / Batch o discontinuos con digestión anaeróbica que son los más usados.

En el cuadro 6 se presenta un resumen de trabajos publicados relacionados con la producción de biohidrógeno, las diferentes condiciones con las cuales se realizaron los experimentos y la producción de hidrógeno.

Cuadro 6. Potencial de biohidrógeno de diferentes biomásas residuales en diversas condiciones de operación

Sustratos	Inoculo	Tem °C	Proceso	Rendimiento de Hidrógeno	Re f.
Patata y calabaza	Lodo anaeróbico pre-tratados con el inhibidor de sodio metanogénicas específica 2-bromoethanesulfonic ácido	35	Digestión anaeróbica	171.1 ml H ₂ /VS	131
Residuos de hinojo	Lodo anaeróbico pre-tratados con el inhibidor de sodio metanogénicas específica 2-bromoethanesulfonic ácido	35	Digestión anaeróbica	58.1 ml H ₂ /vs	131
Estiércol de búfalo	Lodo anaeróbico pre-tratados con el inhibidor de sodio metanogénicas específica 2-bromoethanesulfonic ácido	35	Digestión anaeróbica	135.6 ml H ₂ /vs	131
Rastrojo de maíz	Lodo de aguas residuales	35	Fermentación	2.84 mol H ₂ /mol glucosa	45
Pulpa de remolacha	Aguas residuales del proceso de la remolacha azucarera	35	Fermentación oscura	66.7 d mL H ₂ /g DQO	132
Bagazo caña de azúcar	Aguas residuales sin tratar	35	Digestión anaeróbica	0,83 NL H ₂ ·g	46
Rastrojo de Maíz	Lodo de agua residual	35	Digestión anaeróbica	0,30 NL H ₂ ·g	45
Paja de trigo	Compost de estiércol de vaca	36	Fermentación	68.1 mL H ₂ /g VS	133
Caña común	100 gr cultivos energéticos, residuos agroindustriales, ganado y estiércol de aves	37	Fermentación oscura	<0,1 NL/kg VS-1	9
El maíz	101 gr cultivos energéticos, residuos agroindustriales, ganado y estiércol de aves	37	Fermentación oscura	13,8 NL/kg VS-1	9
El orujo de oliva	102 gr cultivos energéticos, residuos agroindustriales, ganado y estiércol de aves	37	Fermentación oscura	<0,1 NL/kg VS-1	9
Salvado de trigo	103 gr cultivos energéticos, residuos agroindustriales, ganado y estiércol de aves	37	Fermentación oscura	18,9 NL/kg VS-1	9

Continuación cuadro 6.

Papa	Con tratamiento térmico de lodos anaeróbico	37	Digestión anaeróbica	173.3 ml H ₂ /vs	134
Carne de pollo	Con tratamiento térmico de lodos anaeróbico	37	Digestión anaeróbica	6.9 ml H ₂ /vs	134
Los desperdicios de alimentos	Lodo anaeróbico tratada con choque térmico	37	Digestión anaeróbica	310 mL H ₂ /g VS	9
Bagazo caña de azúcar	<i>C. Butyricum</i>	37	Digestión anaeróbica	0,33 NL H ₂ ·g	135
Aguas residuales el ganado de	Lodo de aguas residuales tratadas	45	Digestión anaeróbica	319 ml H ₂ /vs	136
Fracción orgánica de los residuos sólidos urbanos	Lodos anaeróbico	55	Digestión anaeróbica	360 ml H ₂ /vs	137
Residuos vegetales	Compost de residuos de cocina	55	Fermentación anaeróbica	38 ml H ₂ /vs	138
Paja de arroz	Lodos de aguas residuales con tratamiento térmico	55	Fermentación	24.8 mL/g TS	139
Suero de queso	Lodos anaeróbico	55	Fermentación oscura	111 mL H ₂ /g total azúcar	140
Bagazo	Lodos de semillas precalentados	55	Fermentación oscura	300 mL H ₂ /g Vs	141
Estiércol de cerdo	Mucílago de café	55	Co-digestión	7,6 NL H ₂ /L _{CM} d	41
Palma de aceite	<i>Thermoanaerobacterium thermosaccharolyticum</i>	55	Co-fermentación	7.2 L H ₂ /POME y 18.1 mmol H ₂ /L/h.	43
Vinaza yuca	Con tratamiento térmico de lodos	60	Fermentación	53.8 mL H ₂ /g VS	142
Purín de cerdo	Lodos meta génicos mesofilos	70	Digestión	3.65 mL H ₂ /g VS	143

Fuente: Propia

De acuerdo a la información recopilada de las investigaciones referenciadas en el cuadro 6 se puede determinar que la mayoría de estudios se han realizado bajo los siguientes parámetros:

- En reactores tipo batch los cuales suelen usarse en pequeñas producciones o pruebas piloto y trabajan en estado no estacionario.
- Los inóculo más empleados son lodos anaerobios, cultivos energéticos y compuestos orgánicos principalmente estiércol derivado de diferentes

especies, residuos de la industria agrícola, la mayoría de ellos con contenidos lignocelulósicos y nutrientes.

- Los inóculos son sometidos a pretratamiento en su mayoría mediante choque térmico, cabe resaltar que las bajas temperaturas no favorecen el proceso, las temperaturas mesófilas entre 26 °C a 37 °C o más permiten una producción más elevada de hidrógeno.
- La finalidad del pretratamiento es remover la lignina y la hemicelulosa, reducir la cristalinidad de la celulosa e incrementar la porosidad del material, mejorando la liberación de azúcares y evitando la degradación o pérdida de carbohidratos así como la formación de compuestos inhibitorios para la posterior fermentación.
- Varias investigaciones utilizaron cultivos mixtos de bacterias con capacidad hidrolítica en el proceso de digestión anaerobia para la producción de hidrógeno de la comunidad microbiana un 70% de los microorganismos son de la especie Clostridium (géneros productores de lipasas que degradan los lípidos a ácidos grasos; amilasas para la degradación de azúcares menores y proteasas para la degradación de proteínas y aminoácidos) y 14% de la especie Bacillus (productores de proteasas) y Staphylococcus (productores de lipasas y de amilasas).
- En la mayoría de los estudios los bajos resultados en la tasa máxima de producción de hidrógeno estaban asociados a la presencia de bacterias metanogénicas las cuales son consumidoras de hidrógeno, la presencia de ellas está asociado a parámetro de funcionamiento principalmente pH que por debajo de 6,2, la acidez existente en el digestor inhibe fuertemente la actividad de las bacterias metanogénicas por lo que los pH óptimos para la producción de biohidrógeno deben ser muy bajos 4,5 - 6.

Es importante resaltar que en los procesos de codigestión anaerobia, la producción de hidrógeno es variable, según los estudios realizados se puede determinar que las cantidades de hidrógeno se cuantifican en términos de rendimiento, en términos de biomasa y no se expresan en unidades numéricas similares u homólogas entre sí.

6.4.2 Establecimiento del potencial teórico de hidrógeno para la biomasa seleccionada. Para la evaluación del potencial de hidrógeno se tuvo en cuenta la composición química de los residuos seleccionados comparándolos con los tipos de biomasa residual ya estudiados.

Los rendimientos para la producción de hidrógeno varían de un tipo de biomasa a otra y dentro de un mismo tipo de biomasa como se muestra en el cuadro 7 estas variaciones dependen de las condiciones de operación y al tipo de tecnología utilizada tal es el caso del reporte de la producción de hidrógeno a partir de bagazo de caña aunque la cuantificación está en términos de rendimiento o en términos de biomasa no se expresan en unidades homólogas los resultados para tres estudios

son muy diferentes, por ejemplo a partir de la fermentación de la caña de azúcar hidrolizado por *Clostridium butyricum* fue de 1,73 moles de H₂/mol sustrato, este rendimiento se obtuvo con un pH inicial de 5,5 y la concentración inicial de azúcar 20 g/L; en otro estudio para bagazo que se llevó a cabo mediante digestión anaerobia en un sistema discontinuo de dos etapas (acidogénica-metanogénicas) donde la fase acidogénica trabajó como una etapa de hidrólisis y biodetoxificación, permitió la utilización de las más graves condiciones de pretratamiento como $T=178,6^{\circ}\text{C}$ y $t=55$ min y $T=182,9^{\circ}\text{C}$ y $t=40,71$ min el rendimiento fue de 0,83 NL H₂/g; comparándolo con otro estudio de producción microbiana de hidrógeno de bagazo de caña de azúcar utilizando *Bacillus* Sp. Con condiciones de $t=48$ h, pH inicial 7,0, $T=32^{\circ}\text{C}$ el rendimiento fue de 0.23 mol H₂ / mol sustrato, inferior al estudio anterior.

Cuadro 7. Potencial para la biomasa seleccionada de Santander.

Biomasa	Rendimiento de Hidrógeno	Ref.
Bagazo de Palma de aceite	1947 ml de H ₂ /L	42
	7.2 L H ₂ /EPPA and 18.1 mmol H ₂ /L/h	43
Bagazo de Caña de azúcar	0.23 mol H ₂ /mol sustrato	44
	0,30 NL H ₂ ·g	45
	0,83 NL H ₂ ·g	46
	1,73 mol H ₂ /mol s	135
Mucilago de Café	7,6 NL H ₂ /LCMD	41
Porcinaza	1,57 mol-H ₂ / mol-azúcar	48
	9,81 L H ₂ /6 L estiércol	28
	7,6 ml d ⁻¹ (g VS)	64
Bovinaza	743 ml H ₂ / Kg Estiércol de vaca	50
	33,1 mL g ⁻¹ VS	51

Fuente: Propia

En este contexto se evidencia que condiciones de operación tales como temperatura, pH influyen en el rendimiento de hidrógeno, además de la presencia de ciertos microorganismos pueden acelerar procesos de hidrólisis, el nivel de concentración del sustrato también es esencial, las altas o bajas concentraciones afectan al crecimiento de microorganismo, cabe destacar que aunque el material lignocelulósico dispone de una gran cantidad de azúcares, su utilización se puede ver impedida por la recalcitrancia intrínseca del material, una solución a este problema como se muestra en el argumento anterior han sido los diversos pretratamientos fisicoquímicos y biológicos que se han desarrollado para liberar los azúcares.

En estos procesos se pueden obtener cantidades y rendimientos significativos para la producción de hidrógeno lo cual representa un punto de partida que conducirá al

desarrollo de tecnologías encauzadas a satisfacer las necesidades energéticas en el futuro.

6.4.3 Estimación del potencial de hidrógeno. Los carbohidratos contenidos en la biomasa residual, está compuesta de monosacáridos los cuales son la principal fuente de carbono, específicamente la glucosa, xilosa, almidón, celulosa. Se han reportado estudios los cuales indican que el proceso de producción de H₂, se basa en el metabolismo anaerobio del piruvato formado mediante el catabolismo de diferentes sustratos ^{59,76}.

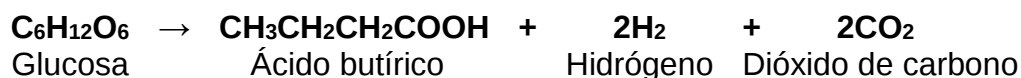
Los subproductos de la fermentación lo constituyen el ácido acético (4 mol de H₂/1 mol de glucosa) y butírico (3.4 mol de H₂/mol de glucosa), con lo que los rendimientos prácticos de hidrógeno en la fermentación oscura están alrededor de 2 mol H₂/mol glucosa ¹⁴⁴.

Las reacciones de biotransformación de la glucosa a ácido acético, H₂ y CO₂ (1) y de la glucosa a ácido butírico, H₂ y CO₂ (2), son referenciadas para la estimación de la producción teórica del hidrógeno ^{145,146}.

(1)



(2)



Estas reacciones muestran que la producción máxima teórica de biohidrógeno a partir de la fermentación de la glucosa es de 4 moles de H₂ por mol de glucosa consumida en la ruta del ácido acético. Sin embargo, el rendimiento de la reacción experimentalmente es menor a causa de que la glucosa la emplean los microorganismos para su crecimiento ⁵⁹.

6.4.3.1 Estimación del potencial de hidrógeno a partir de celulosa. La relación entre la celulosa y el monosacárido glucosa se establece por medio de la hidrólisis ácida, la ecuación estequiométrica principal para la hidrólisis que rige el sistema y la reacción está dada por:

(3)

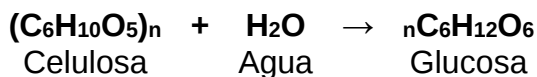


Tabla 6. Rendimiento teórico de hidrógeno a partir de celulosa

Biomasa	% de celulosa peso seco	Rendimiento de hidrógeno teórico mol H ₂ / mol azúcar ruta ácido acético	Rendimiento de hidrógeno teórico mol H ₂ / mol azúcar ruta ácido butírico	Ref.
Bagazo de palma de aceite	43	10617	5308	102-107
Bagazo de caña de azúcar	48	11840	5920	108-113
Mucilago de cacao	50	12320	6160	114
Mucilago de café	30	7407	3700	41,115-118
Caprinaza	11	2716	1340	119,120
Gallinaza	15	3680	1840	13,121,122
Porcinaza	7	1728	860	28,123
Bovinaza	52	12839	6400	124-126

Fuente: Propia

En la tabla 6 se muestra la cantidad de hidrógeno teórico obtenido por la celulosa de cada residuo por las vías de ácido acético y ácido butírico calculados según anexos 1 y 2, la cuantificación realizada se hizo en términos de rendimiento “la cantidad de hidrógeno producido por cantidad de sustrato consumido” y se expresó en unidades de mol H₂/mol de glucosa por tonelada de residuo.

La celulosa presente en la biomasa seleccionada al hidrolizarse completamente en glucosa, se podría llegar a producir hasta 12839 moles de H₂ por la vía ácido acético y de 6400 mol H₂ por la vía ácido butírico dependiendo de la cantidad de celulosa presente. Estos rendimientos reportados se encuentran dentro de la barrera biológica de 4 moles de H₂ por mol de glucosa y 2 moles de H₂ por mol de glucosa, por las diferentes vías lo que muestra que en teoría el rendimiento por la vía del ácido acético es 50% más eficiente.

En un estudio sobre el consumo de sustrato y la producción de hidrógeno a través de co-fermentación de monómeros derivados de hidratos de carbono de biomasa residual a una concentración de glucosa de 6,0 g / L en un tiempo de fermentación a 12 horas, la tasa de producción de hidrógeno aumenta considerablemente a un máximo de 97,1 mL/L/h. La tasa de consumo de glucosa aumentó significativamente a un máximo de 0.219 g/L/h, mientras que la concentración de glucosa

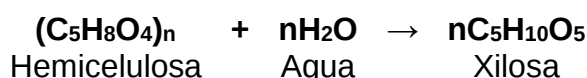
notablemente disminuyó a 3,38 g/L, las bacterias fermentativas anaerobias comenzaron a usar eficientemente la glucosa como sustrato durante la fermentación para producir hidrógeno, ácido acético y ácido butírico, como se muestra en las ecuaciones (1) y (2), según esto los rendimientos de hidrógeno específicos de la glucosa difícilmente pueden exceder de 2,5 mol H₂ / mol de glucosa ¹⁴⁷.

En este contexto la hidrólisis de los carbohidratos genera subproductos como ácidos acético y butírico que están directamente relacionados con la producción de hidrógeno, el rendimiento de hidrógeno es mayor cuando éstos se obtienen en alto porcentaje. Para maximizar el rendimiento de hidrógeno, se deben buscar las condiciones óptimas para que los procesos de metabolismo de las bacterias generen la producción de ácidos grasos volátiles (VFA), específicamente acetato y butirato.

Aunque la máxima producción de hidrógeno también puede obtenerse a partir de un proceso de dos etapas mediante la fermentación de glucosa a acetato y formiato, en la práctica su producción es baja por acción de los microorganismos que consumen glucosa para su crecimiento ⁸².

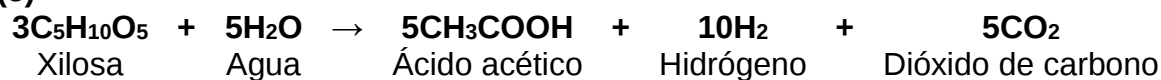
6.4.3.2 Estimación del potencial de hidrógeno a partir de hemicelulosa. La hemicelulosa es otro de carbohidratos presentes en diferentes tipos de biomasa residual, en este caso la hemicelulosa puede ser completamente hidrolizada a xilosa como se muestra en la siguiente ecuación.

(4)

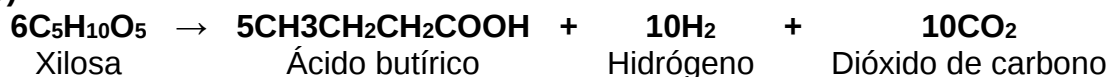


La reacción de biotransformación de xilosa a ácido acético, H₂ y CO₂ (5) y de xilosa a ácido butírico (6) estima la producción teórica de hidrógeno ¹⁴⁷:

(5)



(6)



Esta reacción muestra la producción máxima teórica de biohidrógeno a partir de la fermentación de la xilosa de 10 moles de H₂ por 3 moles de xilosa consumida y de 10 moles de H₂ por 6 moles de xilosa consumida. La tabla 7 muestra el rendimiento teórico de hidrógeno de la biomasa residual seleccionada de acuerdo la presencia de hemicelulosa por las dos vías tomado como base una tonelada de residuo según anexos 3 y 4.

La cantidad de hidrógeno obtenido se cuantifico también en términos de rendimiento “la cantidad de hidrógeno producido por cantidad de sustrato consumido” y se expresó en unidades de mol H₂/mol de xilosa por tonelada de residuo, llegando a una producción de hasta 5777 mol H₂ por la vía ácido acético y de 2880 por la vía ácido butírico.

En comparación con el rendimiento de hidrógeno obtenido a partir de la celulosa es muy bajo por las dos vías. Tal como se muestra en el estudio realizado sobre el rendimiento de hidrógeno específico de la co-fermentación de xilosa y aminoácidos mixtos por bacterias fermentadoras anaerobias que fue sólo 78,6 ml / g de xilosa (15,8% del valor teórico), frente a el rendimiento de hidrógeno específico de 260,9 ml/g de glucosa (52,4% del valor teórico) se logró de la co-fermentación de la glucosa y el ácido glutámico ¹⁴⁷.

Tabla 7. Rendimiento teórico de hidrógeno a partir de hemicelulosa por tonelada de residuo.

Biomasa	% hemicelulosa en peso seco	Rendimiento de hidrógeno teórico mol H ₂ /mol azúcar ruta ácido acético	Rendimiento de hidrógeno teórico mol H ₂ /mol azúcar ruta ácido butírico	Ref.
Bagazo de palma de aceite	22	5533	2760	102- 107
Bagazo de caña de azúcar	23	5777	2880	108- 113
Mucilago de cacao	22	5533	2760	114
Mucilago de café	5	1230	610	41,115 -118
Caprinaza	11	2762	1360	119,12 0
Gallinaza	19	4771	2380	13,121, 122
Porcinaza	20	5000	2500	28,123
Bovinaza	2	500	250	124- 126

Fuente: Propia

De acuerdo a lo obtenido se muestra que el rendimiento teórico para la producción de hidrógeno es mayor por la vía del ácido acético en comparación a la vía ácido butírico, además el rendimiento a partir de la celulosa es mayor en comparación al obtenido por la hemicelulosa como se muestra en las tablas 6 y 7, cabe resaltar que la disponibilidad de glucosa a partir de la celulosa es más factible debido a la organización de este polímero.

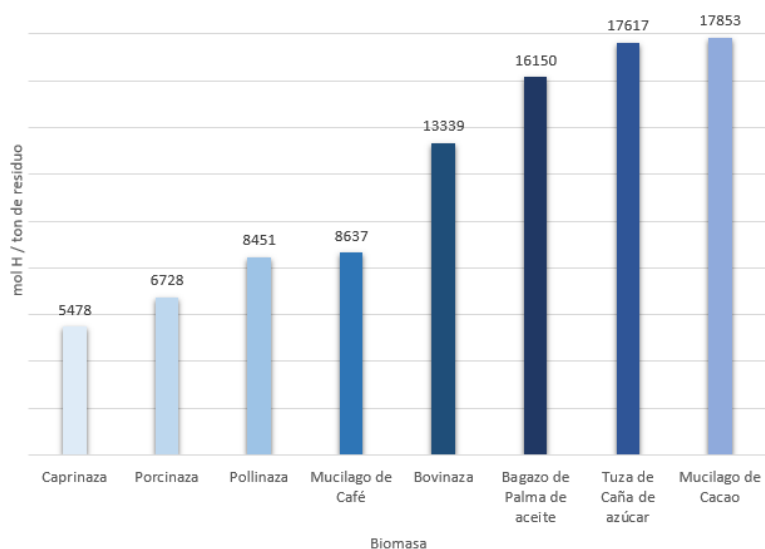
Teniendo en cuenta lo anterior en la figura 17 se muestra el rendimiento total de producción de hidrógeno de la biomasa residual seleccionada vía ácido acético tanto de la celulosa como de la hemicelulosa para cada biomasa por tonelada de residuo, donde se destaca la biomasa de origen vegetal como el mucilago de cacao con un 17853 mol H₂ con un porcentaje de celulosa 50% y hemicelulosa 22%.

Dentro de los residuos agrícolas seleccionados en Santander, los contenidos de celulosa y hemicelulosa varían en concentración, pero para su degradación pueden someterse a pretratamientos suaves (pH: 4,8; T: 45 - 50 C) y luego utilizarlas en la fermentación ¹⁴⁸. La degradabilidad de los sustratos depende de la naturaleza de estos; sustratos de naturaleza compleja su capacidad de biodegradabilidad disminuye.

Para aumentar la biodegradabilidad, y por tanto la calidad de estos sustratos, se tienen que someter a ciertos procesos de pretratamiento generalmente se aplican procesos térmicos, químicos o enzimáticos, para hidrolizar el almidón y la celulosa y dejar el medio con carbohidratos libres para la fermentación.

Para lo anterior es importante destacar que para aumentar los rendimientos de producción de hidrógeno se debe tener en cuenta la relación entre el hidrógeno teórico presente en la biomasa y la cantidad del sustrato, condiciones de operación tales como la presencia de microorganismos consumidores de hidrógeno como las homoacetogénicas y metanogénicas, asimismo procesos de recuperación de hidrógeno que no afecten los procesos metabólicos y que sean óptimos.

Figura 17. Rendimiento total de hidrógeno a partir de la biomasa residual seleccionada vía ácido acético por tonelada de residuo.



Fuente: Propia

Tabla 8. Potencial de hidrógeno para la biomasa de Santander vía ácido acético.

Biomasa	Cantidad de residuo kg/ton kg/día/cabeza	Total Rendimiento mol de H₂/ton residuo	Total Rendimiento mol de H₂/ton residuo real	Rendimiento Energético kJ/kmol H₂
Bagazo de palma de aceite	180 kg/ton	16150	2907	3851,613
Bagazo de caña de azúcar	250 kg/ton	17617	4404,25	4201,478
Mucilago de cacao	40,28 kg/ton	17853	714,12	4257,761
Mucilago de café	64 kg/ton	8637	518,22	2059,838
Caprinaza	2 kg/día	5478	10,96	1306,448
Gallinaza	0,1 kg/día	8451	0,85	2015,478
Porcinaza	3 kg/día	6728	20,18	1604,560
Bovinaza	30 kg/día	13339	400,17	3181,218

*Total rendimiento: tonelada de residuo (total celulosa + total hemicelulosa)

Fuente: Propia

En la tabla 8 se muestra el potencial de hidrógeno teórico partiendo de la cantidad de residuo generado para cada biomasa por tonelada de cultivo, tal es el caso de la bagazo de caña de azúcar con un rendimiento del 49%, seguido del bagazo de palma de aceite con un 32%. Esto demuestra lo que se ha discutido anteriormente, la biomasa de origen vegetal con contenido lignocelulósico iguales o superiores al 50% presenta un mayor rendimiento para la producción de biohidrógeno, en contraste porcentajes menores de 15% al 30% de este contenido no son óptimas para producción de hidrógeno como es el caso de la biomasa de origen animal. Estos cálculos se determinaron por el porcentaje de conversión en base a la cantidad teórica de celulosa y hemicelulosa total que para el caso del bagazo de caña de azúcar es del 71%, mediante hidrólisis ácida su rendimiento es de 4404,25 mol de H₂/ton residuo.

Estudios de la hidrólisis de palma de aceite pre tratado con ácido sulfúrico asistido por microondas mediante cultivo enriquecido en aguas termales alcanzó un potencial de hidrógeno de 1947 ml H₂/L de sustrato, la concentración de sustrato inicial fue de 22,07 g/L ⁴². En este contexto para la eficiencia del proceso de hidrólisis ácida de bagazo de caña sin tratamiento en términos de conversión de carbohidratos originales (celulosa y hemicelulosa) del residuo lignocelulósico

azucarero (bagazo de caña) a azúcares reductores del total presentes en el bagazo en base seca fue de solo 4,18%¹⁴⁹, lo que demuestra que los rendimientos teóricos son superiores principalmente porque durante el proceso factores como microorganismos pueden afectar la productividad del H₂, además de que los rendimientos dependen los pretratamientos previos realizados a la biomasa lignocelulósica, si se emplea la hidrólisis sin pre tratar el material, el rendimiento es menor al 20%, mientras que si el material esta pre tratado, el rendimiento puede ser superior al 90% ¹⁵⁰.

Para los procesos de hidrólisis los rendimientos del azúcar pueden ser de 70% e incluso mayores al 90% de acuerdo a las condiciones y el material ¹⁵¹. La hemicelulosa es generalmente más susceptible a la hidrólisis ácida que la celulosa, se pueden obtener rendimientos de más del 85% con solo una pequeña conversión de celulosa a glucosa ¹⁵².

Cabe destacar que aunque el material lignocelulósico dispone de una gran cantidad de azúcares, su utilización se puede ver impedida por la intrínseca del material, una solución a este problema han sido los diversos pretratamientos fisicoquímicos y biológicos que se han desarrollado para liberar los azúcares ¹⁵³. En estos procesos se pueden obtener cantidades y rendimientos significativos para la producción de hidrógeno lo cual representa un punto de partida que conducirá al desarrollo de tecnologías encauzadas a satisfacer las necesidades energéticas en el futuro.

Los pretratamientos para los materiales lignocelulósicos son para eliminar la lignina y la hemicelulosa, optimizar la enzima de celulasa que aumenta el rendimiento y la velocidad de hidrólisis de la celulosa. Por ejemplo, en pretratamiento como la hidrolisis enzimática basada en concentraciones iniciales de sustrato de 50 g/L la producción de glucosa es de un 80%, lo cual brinda una expectativa realista de la tecnología ¹⁵⁴.

Según el contexto anterior, partiendo de que 1 mol de glucosa genera 4 moles de hidrógeno, al comparar el potencial teórico estequiométrico se muestra una recuperación de glucosa del 100%. Según los estudios cuando se usa la biomasa sin pre tratar la recuperación de glucosa registra solo el 20%, mientras que en los casos de biomasa con pretratamiento se alcanza a estimar según los registros un 90%. Hay que tener en cuenta que los procesos de pretratamientos de la biomasa permiten optimizar y ayudar a degradar más fácilmente el material lignocelulósico para obtener glucosa de manera más eficiente por medio de hidrolisis acida en procesos fermentativos por la ruta de ácido acético.

De acuerdo a los valores de rendimiento del potencial energético la exergía química estándar del hidrógeno se reportan resultados por peso de hidrógeno de 238,490 kJ/kmol ⁸⁷. Según estos registros se calcularon el potencial energético para cada una de las biomásas tomando los resultados obtenidos teóricamente; para el caso del mucílago de cacao del cual se obtuvo el mayor rendimiento 17,853 kmol de

hidrógeno esto equivalen a 4257,762 kJ, lo que indica que el biohidrógeno en Santander es una fuente potencial de generación de energía.

En comparación de otras fuentes energéticas para Colombia, el uso de combustibles fósiles como el carbón se muestra que contiene un alto contenido energético, generando un poder calorífico inferior (PCI) de 26805,88 kJ/kg; mientras que para el uso de la biomasa como la agrícola se estiman valores de PCI que oscilan entre 7862,64 y 19374,25 kJ/kg, para el caso de la biomasa residual bovina oscila entre 6860 y 17800 kJ/kg, mostrándose ambas menores que la del carbón. Sin embargo, estos residuos pueden aprovecharse energéticamente mediante el uso de digestión anaerobia para producir biogás, como fuentes de energías alternativas amigables con el medio ambiente ¹³.

6.4.4 Planteamiento de la relación de codigestión para el establecimiento del potencial de hidrógeno. La digestión anaeróbica es el tratamiento que se da a dos o más residuos, donde se emplea un solo sustrato, este planteamiento brindan ventajas técnicas, medioambientales y económicas ⁷⁸.

La codigestión anaerobia aprovecha la composición de los residuos complementando los procesos a partir de sus características fisicoquímicas. Por ejemplo codigestión de residuos ganaderos y residuos agrícolas; los residuos ganaderos tienen una reducida concentración de materia orgánica superiores al 30% y una baja relación C/N inferiores a 25%, pero cuentan con una concentración elevada de micro y macronutrientes, básicos para el crecimiento de microorganismos anaerobios; así como capacidad tampón fundamental para evitar procesos de acidificación ¹²⁸. Los residuos agrícolas son ricos en carbohidratos, proteínas y grasas suelen tener una alta proporción de materia orgánica biodegradable y una alta relación C/N, pero su digestión anaerobia se ve afectada negativamente por la ausencia de micronutrientes y también por problemas de acidificación ⁹⁴.

La mezcla de los dos tipos de residuos da lugar a sustratos más estables para procesos de codigestión y pueden generar mayor producción de biohidrógeno ⁷⁵. Por ejemplo, la producción de 10-20 m³ biogás/t en una digestión anaerobia mono-sustrato con deyecciones ganaderas se podría duplicar incorporando un 20-30% de residuos alimentarios ¹⁵⁵.

Los procesos de codigestión pueden generar un aprovechamiento de los residuos orgánicos de una zona geográfica determinada para obtener una fuente de energía de carácter renovable en forma de biohidrógeno y biogás, además de esto los subproductos resultantes de la digestión pueden ser usados como fertilizantes orgánicos. Este proceso promueve un reciclaje de residuos orgánicos, reduciendo el impacto ambiental como la contaminación suelo, agua, olores, etc.

La producción de biohidrógeno mediante codigestión se muestra que es una de las tecnologías más eficientes y aplicables para la generación de biohidrógeno. De los residuos seleccionados la producción teórica viable según su composición fisicoquímica mediante procesos de codigestión que generen un sustrato óptimo para la producción de hidrógeno se han establecidos según la complementariedad para la digestión anaerobia, especialmente en lo que se refiere a la relación C/N, cantidad de carbonos para degradar y cantidad de nitrógeno para descomponer, de esta manera la relación para procesos de codigestión se relacionan con los residuos que contengan mayor cantidad de moléculas de carbono, de los seleccionados todos los cultivos agrícolas; con los residuos con mayor presencia de compuestos nitrogenados, los residuos animales.

La variación en la composición del estiércol depende de la especie animal, de su alimentación, contenido de materia seca, según que el animal esté creciendo o no. Para la práctica y uso en general se puede considerar que el estiércol contiene por tonelada un promedio 5 kg de nitrógeno, 2,5 kg de fósforo y 4,5 kg de potasio ¹⁵⁶.

Esta combinación permite mayor estabilidad en los parámetros de procesos de digestión anaeróbica para balancear los nutrientes, como regla general, se plantea que debe ser cercana a 100:1.75 en base a la Demanda Química de Oxígeno ¹⁵⁷. La codigestión anaerobia permite aprovechar la complementariedad de la composición de los residuos para hacer procesos más eficientes.

Según el contexto anterior la codigestión permite integrar la valorización de los residuos orgánicos de una zona geográfica determinada para este estudio Santander, de este modo se puede obtener una fuente de energía de carácter renovable como lo es el biohidrógeno, y por otro un subproducto resultante de la digestión denominado digestato con características de fertilizante orgánico y aplicable en agricultura bajo condiciones controladas.

Este proceso ya está siendo implementado en el proyecto de la Planta de biogás de la Granja San Ramón (Campo Arcís, Requena) quienes utilizan de deyecciones ganaderas y otros materiales orgánicos de origen vegetal; a nivel de producción de deyecciones ganaderas, esta explotación produce alrededor de 35.000 toneladas de estiércol al año, que son codigeridas con otros sustratos de origen vegetal ⁷⁵.

Estudios han demostrado que la adición de residuos de vegetales y de residuos de granjas como excretas de animales presenta un aumento hasta del 98% en la producción de metano a diferencia del potencial obtenido con la digestión de sustratos por separado, tal como se presenta en el cuadro 9, el cual compara rendimientos de producción de metano cuando se realiza el proceso de codigestion¹⁵⁸.

Cuadro 8. Codigestión para la producción de metano.

Mezcla	BMP de mezcla (m ³ /kg)			
	BMP mezcla (m ³ /kg sv)	Sustrato base	BMP individual (m ³ /kgsv)	Aumento (%)
Excreta de cerdo + hojas secas + cachaza + pulpa de guayaba	30	Excreta de cerdo	0,40	98,6
Banano + café + flores+ maíz+ cascarilla de arroz+ papas + frutas	0,24	Maíz	0,10	58,3
Estiércol de cerdo+ fruta	1,45	R. De fruta	0,2	54,1
Excremento bovino+ residuos de poda	34,3	E. Bovino	0,6	88,4
Bagazo de caña + residuos de café + residuos de poda	12,78	R. De poda	0,76	94,1
Estiércol+ residuos hortofrutícolas	1,97	R. De poda	0,2	89,84
Estiércol+ residuos vegetales	16,01	R. Vegetales	0,37	97,6
Papa+ zanahoria+ tomate+ excremento de cerdo	0,74	R. Papa	0,45	39,1
Residuos hortofrutícolas+ residuos alto contenido de grasas (papa)	1,601	R. Papa	0,6	43,4
Ensilado de maíz+ excremento especies bovinas	0,767	Ensilado de maíz	0,7	70,1
Residuos lignocelulósicos + residuos hortofrutícolas	1,155	R. De fruta	0,42	63,6

Fuente: Tesis de Ingeniería Ambiental ¹⁵⁸

De acuerdo con los potenciales de hidrógeno obtenidos teóricamente por cálculos estequiométricos según la disponibilidad de contenido lignocelulósico de la biomasa seleccionada y tomando como referencia la disponibilidad de compuestos nutricionales reportados se puede establecer unas posibles mezclas óptimas para procesos de codigestión como se muestran en el cuadro 8.

Cuadro 9. Mezclas opcionales para la codigestión de sustratos para Santander

Mezcla	Sustrato Base	C/N*	PTH* mol H ₂ /ton residuo	Sustrato Base	C/N*	PTH* mol H ₂ /ton residuo	PTH* Mezcla mol H ₂ /ton residuo	%
Bagazo de Caña de azúcar + Bovinaza	Bagazo de Caña de azúcar	22 - 150	4404,25	Bovinaza	18 - 38	400,17	4804,42	90,91
Mucilago de Cacao + Porcinaza	Mucilago de Cacao	NE	714,12	Porcinaza	12 - 25	20,18	734,3	97,17

Continuación cuadro 9.

Bagazo de Palma de aceite + Caprinaza	Bagazo de Palma de aceite	24	2907	Caprinaza	16 - 32	10,96	2917,96	99,62
Bagazo de Caña de azúcar + Gallinaza	Bagazo de Caña de azúcar	22 - 150	4404,25	Gallinaza	7 - 16	0,85	4405,1	99,98
Mucilago de Café + Bovinaza	Mucilago de Café	20 - 110	714,12	Bovinaza	18 - 38	400,17	918,39	22,77

***PTH: potencial teórico de hidrógeno**

***C/N:** relación carbono – nitrógeno, datos aproximados ¹⁵⁹.

La elección de estos substratos para las mezclas se debe a su disponibilidad y necesidad de gestión a nivel local. Por otro lado, la digestión de residuos pecuarios con residuos agrícolas puede generar resultados positivos para el proceso, debido fundamentalmente a la mejora de la relación C/N del medio de digestión. Para el caso de Santander, de acuerdo con la disponibilidad de los residuos, algunas opciones de proporciones de mezcla se consideraron para tratar de guardar la relación 30:1 ⁹⁴; la relación de estas mezclas deben ser optimas, a causa de que un exceso de residuos pecuarios puede provocar problemas de inhibición amoniacal, su exceso generaría inhibición o inestabilidad por desajustes cinéticos de las etapas de digestión; se considera que la relación C/N adecuada para procesos fermentativos debe oscilar entre 15 y 35 por lo que se pueden considerar todas las biomasas seleccionadas para procesos de codigestión ⁹⁵.

7. CONCLUSIONES

La revisión y el estudio bibliométrico en revistas especializadas evidencia un incremento en el interés de la comunidad científica desde el 2008 a la fecha en el tema de producción de biohidrógeno con más de 300 publicaciones.

De las 2290 publicaciones registradas a julio de 2016 en la base de datos de scopus, de los 10 países con más publicaciones, se observa que el mayor interés en la investigación de producción de biohidrógeno se ha enfocado en China con un 32,44% y Estados Unidos con un 15%; en estos países se ha realizado más del 40% de las publicaciones en este tema, es importante resaltar la investigación desarrollada en los países de América Latina donde en su mayoría se ha concentrado en Brasil.

En términos de la biomasa se estima que es una fuente energética renovable de fácil disponibilidad la cual puede contribuir tanto a sectores energéticos como medioambientales y económicos, con uso de diferentes tecnologías mediante procesos bioquímicos de codigestión para la obtención de biohidrógeno, que en términos ambientales generan un gas amigable con el medio ambiente.

La biomasa residual necesita de un pretratamiento para reducir el tamaño de la materia, permitir el crecimiento de microorganismos necesarios en los procesos biológicos, minimizar la demanda energética de las reacciones, dentro de los pretratamientos más usados se encuentran los físicos asociados al sometimiento de la biomasa a temperaturas altas para descomponer y degradar más fácilmente el material lignocelulósico; y químicos de naturaleza acida o básica.

Los residuos de mayor aporte en el potencial encontrado corresponden a aquellos alcanzados de actividades relacionadas con los cultivos de cacao y palma de aceite.

Se aprecia que la mayoría de las investigaciones muestran el desarrollo de la producción de hidrógeno a escala de laboratorio y con menor frecuencia a escala piloto.

El departamento de Santander se estima que es una zona que cuenta con gran disponibilidad de materia prima para la producción de diferentes tipos de biomasa residuales de origen animal, vegetal e industrial, razón por la cual se convierte en una zona propicia para el uso de tecnologías en procesos de codigestión que generen energías alternativas sectorialmente.

El departamento de Santander tiene un potencial para la producción de biohidrógeno calculado del rendimiento energético de la cantidad de biomasa seleccionada por tonelada de todos los residuos de 22478,394 KJ producto de la reutilización de los residuos agroindustriales.

Los principales residuos generados en el departamento de Santander con características fisicoquímicas propicias para la producción de biohidrógeno son de origen vegetal como el mucilago de cacao, mucilago de café, caña de azúcar, bagazo de palma de aceite y de origen animal estiércol porcino, bobino, caprino y de gallinaza.

Todos los métodos biológicos para la producción de hidrógeno brindan resultados prometedores, la codigestión anaeróbica es una de las alternativas más atractivas que permite la integración de residuos que generen sustratos con condiciones de biotransformación como rutas metabólicas de los microorganismos, presencia de nutrientes y composición fisicoquímica propicias para el desarrollo de esta tecnología.

La producción máxima teórica de biohidrógeno a partir de la fermentación de la glucosa es de 4 moles de H_2 por mol de glucosa consumida en la ruta del ácido acético. Sin embargo, el rendimiento de la reacción experimentalmente es menor a causa de que la glucosa la emplean los microorganismos para su crecimiento

8. RECOMENDACIONES

Como se muestra en el presente documento se espera que la tendencia en el interés de la comunidad científica en el tema de producción de biohidrógeno registrado en la figura 4 se mantenga dadas las desventajas de los combustibles fósiles.

Se espera que la comunidad científica en América Latina aumente su interés en el tema de producción de biohidrógeno como fuente energética alternativa, dada la dependencia actual a los combustibles fósiles, y teniendo en cuenta la poca oferta y altos costos de estas.

Parte de un objetivo abarca el uso de los residuos, que constituye un problema ambiental en lo que respecta a su disposición, en Santander se generan grandes cantidades de residuos pero su disposición no es adecuada o no son utilizados apropiadamente; se espera para el futuro el uso de esta biomasa residual para el desarrollo de tecnologías en el tema de producción de biohidrógeno como fuente energética alternativa, lo cual podría contribuir en el crecimiento económico de la región.

Aunque existen algunas opciones energéticas sustentables que pueden surgir, una alternativa que cumple con las características de ser limpia y sustentable, es la utilización de hidrógeno como combustible; para obtener la máxima producción de hidrógeno se deben realizar más estudios que incluyan optimización de los factores.

Hay que tener presente que la optimización de condiciones de cultivo como pH, temperatura, contenido de nutrientes, presión, eliminación de microorganismos competidores y optimización de los biorreactores, podrán contribuir al incremento en la producción de hidrógeno.

Los procesos productivos para la generación de biohidrógeno deben tener como finalidad el aprovechamiento de las fuentes de carbono presente en los sustratos, para permitir que de la degradación de los carbohidratos junto con la actividad biotransformadora de los microorganismos se conviertan en hidrógeno.

Aunque se tomaron estos datos anuales se debe hacer un estudio para el aprovechamiento de la biomasa por zonas para determinar las capacidades de producción, disponibilidad y localización de biomasa mensuales en el departamento de Santander para la implementación de plantas de generación de biohidrógeno.

Se recomienda realizar estudios experimentales de caracterizaciones químicas de las muestras para detectar posibles inhibidores de los procesos para la producción de hidrógeno.

BIBLIOGRAFÍA

1. Murphy, R. M.; Reza, J. C. Introduccion a los procesos quimicos: principios, analisis y sintesis. *Serie: Ingenieria quimica (Mexico)*. 2007.
2. Jorge Guillermo Ibáñez Cornejo, Ed.; In *Química ambiental*; McGraw-Hill Interamericana: Mexico, 2013; Vol. 1a. ed., pp 381.
3. Karp, G. *Biología celular y molecular: conceptos y experimentos (6a)*; McGraw Hill Mexico: 2011; .
4. Enger, E. D. B.; SMITH, A. T.; Enger, BRADLEY F Eldon D; Smith, B. F. *Ciencia Ambiental: un estudio de interrelaciones*; McGraw-Hill,: 2006; .
5. Petroleum, B. BP statistical review of world energy. 2012.
6. Ahmadi Moghaddam, E.; Ahlgren, S.; Hulteberg, C.; Nordberg, Å Energy balance and global warming potential of biogas-based fuels from a life cycle perspective. *Fuel Process Technol* 2015, 132, 74-82.
7. Bilgen, S. Structure and environmental impact of global energy consumption. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 2014, 38, 890-902.
8. Zech, K.; Oehmichen, K.; Grasemann, E.; Michaelis, J.; Funke, S.; Seiffert, M. Technical, economic and environmental assessment of technologies for the production of biohydrogen and its distribution: Results of the Hy-NOW study. *Int J Hydrogen Energy* 2015, 40, 5487-5495.
9. Corneli, E.; Dragoni, F.; Adessi, A.; De Philippis, R.; Bonari, E.; Ragaglini, G. Energy conversion of biomass crops and agroindustrial residues by combined biohydrogen/biomethane system and anaerobic digestion. *Bioresour. Technol.* 2016, 211, 509-518.
10. McKendry, P. Energy production from biomass (part 2): conversion technologies. *Bioresour. Technol.* 2002, 83, 47-54.
11. Oficial, D. Ley 697 de 2001. 2001.
12. upme. MINMINAS. BID. fmam Integración de las energías renovables no convencionales en Colombia. *Integración de las energías renovables no convencionales en Colombia* 2015, CONVENIO ATN/FM-12825-CO, 43-48.
13. Humberto Escalante Hernández, Janneth Orduz Prada, Henry Josué Zapata Lesmes, María Cecilia Cardona Ruiz, Martha Duarte Ortega *Atlas del Potencial Energético de la Biomasa Residual en Colombia*; COLOMBIA, 2006; Vol. 1, pp 182.
14. Renovables, E. Energía Biomasa. *Publicado por la Subsecretaría de Energía Eléctrica Secretaría de Energía. República Argentina. Sitio web: <http://energia.mecon.gov.ar>* 2004.
15. BUN-CA, U. Manuales sobre energía renovable: Biomasa. 2002.
16. García, J. A.; Yañez, E. E. Generación y uso de biomasa en plantas de beneficio de palma de aceite en Colombia. *Revista Palmas* 2010, 31, 41-48.
17. Noor, Z. Z.; Yusuf, R. O.; Abba, A. H.; Abu Hassan, M. A.; Mohd Din, M. F. An overview for energy recovery from municipal solid wastes (MSW) in Malaysia scenario. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 2013, 20, 378-384.

18. Ahmadi Moghaddam, E.; Ahlgren, S.; Hulteberg, C.; Nordberg, Å Energy balance and global warming potential of biogas-based fuels from a life cycle perspective. *Fuel Process Technol* 2015, 132, 74-82.
19. Lee, Z. H.; Sethupathi, S.; Lee, K. T.; Bhatia, S.; Mohamed, A. R. An overview on global warming in Southeast Asia: CO₂ emission status, efforts done, and barriers. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 2013, 28, 71-81.
20. OMS Informacion Basica sobre la contaminacion atmosferica urbana. http://www.who.int/phe/health_topics/outdoorair/databases/background_information/es/index4.html (accessed 04/04, 2016).
21. San Román, J. F. Posibilidades de aprovechamiento económico de la biomasa residual. *Agricultura y sociedad* 1985, 219-236.
22. Nazira Gonzalez Solano In *In Manejo de Desechos Solidos Biodegradables*; 1996; Vol. X Congreso Nacional Agronómico.
23. Závodská, A.; Benešová, L.; Smyth, B.; Morrissey, A. J. A comparison of biodegradable municipal waste (BMW) management strategies in Ireland and the Czech Republic and the lessons learned. *Resour. Conserv. Recycling* 2014, 92, 136-144.
24. Quetzalli Aguilar Virgen, Carolina Armijo de Vega, Paul Taboada González, Xochitl M. Aguilar Potencial de recuperación de residuos sólidos domésticos dispuestos en un relleno sanitario. *Potential Recovery of Domestic Solid Waste Disposed of in a Landfill* 2010, 32, 16-27.
25. Tawfik, A.; El-Qelish, M. Key factors affecting on bio-hydrogen production from co-digestion of organic fraction of municipal solid waste and kitchen wastewater. *Bioresour. Technol.* 2014, 168, 106-111.
26. Özgür, E.; Mars, A. E.; Peksel, B.; Louwerse, A.; Yücel, M.; Gündüz, U.; Claassen, P. A. M.; Eroglu, I. Biohydrogen production from beet molasses by sequential dark and photofermentation. *Int J Hydrogen Energy* 2010, 35, 511-517.
27. Kim, D.; Kim, M. Development of a novel three-stage fermentation system converting food waste to hydrogen and methane. *Bioresour. Technol.* 2013, 127, 267-274.
28. Zhu, J.; Li, Y.; Wu, X.; Miller, C.; Chen, P.; Ruan, R. Swine manure fermentation for hydrogen production. *Bioresour. Technol.* 2009, 100, 5472-5477.
29. Wang, J.; Wan, W. Factors influencing fermentative hydrogen production: A review. *Int J Hydrogen Energy* 2009, 34, 799-811.
30. Poggi-Varaldo, H. M.; Munoz-Paez, K. M.; Escamilla-Alvarado, C.; Robledo-Narváez, P. N.; Ponce-Noyola, M. T.; Calva-Calva, G.; Ríos-Leal, E.; Galíndez-Mayer, J.; Estrada-Vázquez, C.; Ortega-Clemente, A.; Rinderknecht-Seijas, N. F. Biohydrogen, biomethane and bioelectricity as crucial components of biorefinery of organic wastes: A review. *Waste Management and Research* 2014, 32, 353-365.
31. Menardo, S.; Balsari, P. An Analysis of the Energy Potential of Anaerobic Digestion of Agricultural By-Products and Organic Waste. *Bioenergy Research* 2012, 5, 759-767.
32. Bridges, A.; Felder, F. A.; McKelvey, K.; Niyogi, I. Uncertainty in energy planning: Estimating the health impacts of air pollution from fossil fuel electricity generation. *Energy Research & Social Science* 2015, 6, 74-77.

33. Armor, J. N. The multiple roles for catalysis in the production of H₂. *Applied Catalysis A: General* 1999, 176, 159-176.
34. Karin Willquist Hydrogen: the green energy carrier of the future? *Hydrogen may be the fuel of the future, but how can we produce it sustainably? Karin Willquist explains*. 2012, 22, 12.
35. Alejandro Martínez, Diana Barreneche, Daniela Bellon, Diana Plata, Diana Latorre, Alex Porras, Luis Rincón ESTUDIO DE FACTIBILIDAD DE LA ECONOMIA DEL HIDRÓGENO EN COLOMBIA. 2013.
36. Hallenbeck, P. C.; Abo-Hashesh, M.; Ghosh, D. Strategies for improving biological hydrogen production. *Bioresour. Technol.* 2012, 110, 1-9.
37. Ministerio de Minas y Energía Ley 1715 de 2014. [www. ipse. gov. co/ipse/comunicaciones-ipse/publicaciones/tips-energeticos/913-tips-energeticos-no-2](http://www.ipse.gov.co/ipse/comunicaciones-ipse/publicaciones/tips-energeticos/913-tips-energeticos-no-2). 2014.
38. Tyagi, V. K.; Angérez Campoy, R.; Álvarez-Gallego, C. J.; Romero García, L. I. Enhancement in hydrogen production by thermophilic anaerobic co-digestion of organic fraction of municipal solid waste and sewage sludge – Optimization of treatment conditions. *Bioresour. Technol.* 2014, 164, 408-415.
39. Sekoai, P. T.; Gueguim Kana, E. B. Semi-pilot scale production of hydrogen from Organic Fraction of Solid Municipal Waste and electricity generation from process effluents. *Biomass Bioenergy* 2014, 60, 156-163.
40. Abd-Alla, M. H.; Morsy, F. M.; El-Enany, A. -. E. Hydrogen production from rotten dates by sequential three stages fermentation. *Int J Hydrogen Energy* 2011, 36, 13518-13527.
41. Hernández, M. A.; Rodríguez Susa, M.; Andres, Y. Use of coffee mucilage as a new substrate for hydrogen production in anaerobic co-digestion with swine manure. *Bioresour. Technol.* 2014, 168, 112-118.
42. Khamtib, S.; Plangklang, P.; Reungsang, A. Optimization of fermentative hydrogen production from hydrolysate of microwave assisted sulfuric acid pretreated oil palm trunk by hot spring enriched culture. *Int J Hydrogen Energy* 2011, 36, 14204-14216.
43. Mamimin, C.; Jehlee, A.; Saelor, S.; Prasertsan, P.; O-Thong, S. Thermophilic hydrogen production from co-fermentation of palm oil mill effluent and decanter cake by *Thermoanaerobacterium thermosaccharolyticum* PSU-2. *Int J Hydrogen Energy* .
44. Manikkandan, T.; Dhanasekar, R.; Thirumavalavan, K. Microbial production of Hydrogen from sugarcane Bagasse using *Bacillus* Sp. *Int J ChemTech Res* 2009, 1, 344-348.
45. Datar, R.; Huang, J.; Maness, P. -.; Mohagheghi, A.; Czernik, S.; Chornet, E. Hydrogen production from the fermentation of corn stover biomass pretreated with a steam-explosion process. *Int J Hydrogen Energy* 2007, 32, 932-939.
46. Baêta, B. E. L.; Lima, D. R. S.; Filho, J. G. B.; Adarme, O. F. H.; Gurgel, L. V. A.; Aquino, S. F. d. Evaluation of hydrogen and methane production from sugarcane bagasse hemicellulose hydrolysates by two-stage anaerobic digestion process. *Bioresour. Technol.* 2016, 218, 436-446.

47. Pattra, S.; Sangyoka, S.; Boonmee, M.; Reungsang, A. Bio-hydrogen production from the fermentation of sugarcane bagasse hydrolysate by *Clostridium butyricum*. *Int J Hydrogen Energy* 2008, 33, 5256-5265.
48. Wu, X.; Lin, H.; Zhu, J. Optimization of continuous hydrogen production from co-fermenting molasses with liquid swine manure in an anaerobic sequencing batch reactor. *Bioresour. Technol.* 2013, 136, 351-359.
49. Wang, Y.; Zhang, Y.; Meng, L.; Wang, J.; Zhang, W. Hydrogen–methane production from swine manure: Effect of pretreatment and VFAs accumulation on gas yield. *Biomass Bioenergy* 2009, 33, 1131-1138.
50. Yokoyama, H.; Waki, M.; Ogino, A.; Ohmori, H.; Tanaka, Y. Hydrogen fermentation properties of undiluted cow dung. *Journal of bioscience and bioengineering* 2007, 104, 82-85.
51. Gilroyed, B. H.; Li, C.; Hao, X.; Chu, A.; McAllister, T. A. Biohydrogen production from specified risk materials co-digested with cattle manure. *Int J Hydrogen Energy* 2010, 35, 1099-1105.
52. Vázquez, M. A.; de la Varga, D.; Plana, R.; Soto, M. Integrating liquid fraction of pig manure in the composting process for nutrient recovery and water re-use. *J. Clean. Prod.* 2015, 104, 80-89.
53. Ruggeri, B.; Luongo Malave, A. C.; Bernardi, M.; Fino, D. Energy efficacy used to score organic refuse pretreatment processes for hydrogen anaerobic production. *Waste Manage.* 2013, 33, 2225-2233.
54. Ministerio de Medio Ambiente, Sociedad de Agricultores de Colombia *Guia Ambiental para el Subsector Porcicola*; Fondo Nacional de la Porcicultura: 2002; Vol. 1, pp 102.
55. Vavilin, V. A.; Fernandez, B.; Palatsi, J.; Flotats, X. Hydrolysis kinetics in anaerobic degradation of particulate organic material: An overview. *Waste Manage.* 2008, 28, 939-951.
56. Dearman, B.; Bentham, R. H. Anaerobic digestion of food waste: Comparing leachate exchange rates in sequential batch systems digesting food waste and biosolids. *Waste Manage.* 2007, 27, 1792-1799.
57. Pang, R.; Deng, Z.; Hu, J. Clean energy use and total-factor efficiencies: An international comparison. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 2015, 52, 1158-1171.
58. Hay, J. X. W.; Wu, T. Y.; Juan, J. C.; Md. Jahim, J. Biohydrogen production through photo fermentation or dark fermentation using waste as a substrate: Overview, economics, and future prospects of hydrogen usage. *Biofuels, Bioproducts and Biorefining* 2013, 7, 334-352.
59. Kapdan, I. K.; Kargi, F. Bio-hydrogen production from waste materials. *Enzyme Microb. Technol.* 2006, 38, 569-582.
60. Nathao, C.; Sirisukpoka, U.; Pisutpaisal, N. Production of hydrogen and methane by one and two stage fermentation of food waste. *Int J Hydrogen Energy* 2013, 38, 15764-15769.
61. Gonzalez-Fernandez, C.; Sialve, B.; Molinuevo-Salces, B. Anaerobic digestion of microalgal biomass: Challenges, opportunities and research needs. *Bioresour. Technol.* 2015, 198, 896-906.

62. Xiao, L.; Deng, Z.; Fung, K. Y.; Ng, K. M. Biohydrogen generation from anaerobic digestion of food waste. *Int J Hydrogen Energy* 2013, 38, 13907-13913.
63. Pendyala, B.; Chaganti, S. R.; Lalman, J. A.; Heath, D. D.; Shanmugam, S. R.; Veeravalli, S. S. Using a food and paper-cardboard waste blend as a novel feedstock for hydrogen production: Influence of key process parameters on microbial diversity. *Int J Hydrogen Energy* 2013, 38, 6357-6367.
64. Wang, Y.; Zhang, Y.; Meng, L.; Wang, J.; Zhang, W. Hydrogen–methane production from swine manure: Effect of pretreatment and VFAs accumulation on gas yield. *Biomass Bioenergy* 2009, 33, 1131-1138.
65. Vavilin, V. A.; Rytov, S. V.; Lokshina, L. Y.; Rintala, J. A.; Lyberatos, G. Simplified hydrolysis models for the optimal design of two-stage anaerobic digestion. *Water Res.* 2001, 35, 4247-4251.
66. Wang, D.; Zeng, G.; Chen, Y.; Li, X. Effect of polyhydroxyalkanoates on dark fermentative hydrogen production from waste activated sludge. *Water Res.* 2015, 73, 311-322.
67. Huang, W.; Wang, Z.; Zhou, Y.; Ng, W. J. The role of hydrogenotrophic methanogens in an acidogenic reactor. *Chemosphere* 2015, 140, 40-46.
68. Zahedi, S.; Sales, D.; Romero, L. I.; Solera, R. Hydrogen production from the organic fraction of municipal solid waste in anaerobic thermophilic acidogenesis: Influence of organic loading rate and microbial content of the solid waste. *Bioresour. Technol.* 2013, 129, 85-91.
69. Ghosh, S.; Conrad, J. R.; Klass, D. L. Anaerobic Acidogenesis of Wastewater Sludge. *Journal (Water Pollution Control Federation)* 1975, 47, 30-45.
70. Li, Y.; Zhang, Y.; Xu, Z.; Quan, X.; Chen, S. Enhancement of sludge granulation in anaerobic acetogenesis by addition of nitrate and microbial community analysis. *Biochem. Eng. J.* 2015, 95, 104-111.
71. Fountoulakis, M. S.; Stamatelatos, K.; Lyberatos, G. The effect of pharmaceuticals on the kinetics of methanogenesis and acetogenesis. *Bioresour. Technol.* 2008, 99, 7083-7090.
72. Zamanzadeh, M.; Parker, W. J.; Verastegui, Y.; Neufeld, J. D. Biokinetic and molecular studies of methanogens in phased anaerobic digestion systems. *Bioresour. Technol.* 2013, 149, 318-326.
73. UEKI, K.; UEKI, A.; SIMOGOH, Y. Terminal steps in the anaerobic digestion of municipal sewage sludge: Effects of inhibitors of methanogenesis and sulfate reduction. *The Journal of General and Applied Microbiology* 1988, 34, 425-432.
74. van Lier, J. B.; Mahmoud, N.; Zeeman, G. Anaerobic wastewater treatment. *biological wastewater treatment, principles, modelling and design* 2008, 415-456.
75. A. Pascual, B. Ruiz, P. Gómez Valorización energética: producción de biogás mediante co-digestión anaerobia de residuos/subproductos orgánicos agroindustriales. *Dept. Calidad y Medio Ambiente (ainia CENTRO TECNOLÓGICO)* 2011.
76. I. Ntaikou, G. Antonopoulou, G. Lyberatos 1. Biohydrogen production from biomass and wastes via dark fermentation, A review: Waste Biomass Valorization. 2010, 1, 21-39.
77. Miyake, J.; Matsunaga, T.; San Pietro, A. *Biohydrogen II*; Elsevier: 2001; .

78. Chen, X.; Romano, R. T.; Zhang, R. Anaerobic digestion of food wastes for biogas production. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering* 2010, 3, 61-72.
79. Lee, D.; Xu, K.; Kobayashi, T.; Li, Y.; Inamori, Y. Effect of organic loading rate on continuous hydrogen production from food waste in submerged anaerobic membrane bioreactor. *Int J Hydrogen Energy* .
80. Bálint, B.; Bagi, Z.; Tóth, A.; Rákhely, G.; Perei, K.; Kovács, K. L. Utilization of keratin-containing biowaste to produce biohydrogen. *Appl. Microbiol. Biotechnol.* 2005, 69, 404-410.
81. Escamilla-Alvarado C., Poggi-Varaldo H., Ponce-Noyola M. T., Producción de hidrógeno y metano como biocombustibles bajo el esquema de biorrefinería. 2011, *Ide@s CONCYTEG* 6 - 71, 526-539.
82. Valentine, D. L.; Blanton, D. C.; Reeburgh, W. S. Hydrogen production by methanogens under low-hydrogen conditions. *Arch. Microbiol.* 2000, 174, 415-421.
83. García-Cuadra F., Jawiarczyk N., González-López C.V. Valorization of microalgal biomass: Exploitation of proteins, carbohydrates and lipids. *Revista Latinoamericana de Biotecnología Ambiental y Algal* 2012, 3, 58-72.
84. Tena, E. C. Energía obtenida a partir de biomasa. *Cuadernos económicos de ICE* 2012, 117-140.
85. Martínez, P. E. P. BIOMASA RESIDUAL VEGETAL: TECNOLOGÍAS DE TRANSFORMACIÓN Y ESTADO ACTUAL. *INNOVACIENCIA* 2014, 2, 45-52.
86. SÁNCHEZ TORRES, J. M.; Palop, F. Herramientas de software para la práctica en la empresa de la Vigilancia Tecnológica y la Inteligencia Competitiva. *Evaluación Comparativa. Valencia: TRIZ XXI* 2002.
87. Mhilu, C. Modeling performance of high-temperature biomass gasification process. *ISRN Chemical Engineering* 2012, 2012.
88. Scarano, F.; Guimarães, A.; da Silva, J. M. Rio 20: Lead by example. *Nature* 2012, 486, 25-26.
89. Laborde, M. A.; Lombardo, E. A.; Noronha, F. B.; Boaventura Filho, J. S. Potencialidades del hidrogeno como vector de energia em iberoamérica. *Buenos Aires: Ediciones CYTED* 2010.
90. Demirbas, A. Hydrogen-rich gas from fruit shells via supercritical water extraction. *Int J Hydrogen Energy* 2004, 29, 1237-1243.
91. Yoshida, T.; Oshima, Y.; Matsumura, Y. Gasification of biomass model compounds and real biomass in supercritical water. *Biomass Bioenergy* 2004, 26, 71-78.
92. Valdez-Vazquez, I.; Acevedo-Benítez, J. A.; Hernández-Santiago, C. Distribution and potential of bioenergy resources from agricultural activities in Mexico. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 2010, 14, 2147-2153.
93. Zhang, B.; Zhang, L.; Yang, Z.; Yan, Y.; Pu, G.; Guo, M. Hydrogen-rich gas production from wet biomass steam gasification with CaO/MgO. *Int J Hydrogen Energy* 2015, 40, 8816-8823.
94. Martinez, T. F. J.; Quilez, A.; Galvez, S. L.; Perez, M. M. D.; Perez, E. A.; Paredes, C.; Medina, E.; Agullo, E.; Moreno, C. J.; Moral, R., Eds.; In *Co - Compostaje de residuos de poda de palmera junto con residuos verdes y estiercol. I*

CONGRESO ESTATAL DE AGRICULTURA ECOLOGICA URBANA Y PERIURBANA; SEAE - Sociedad Ecológica de Agricultura Ecológica / Agroecología., Ed.; Imag Impressions, s.l. -Benifaio-Valencia: España, 2011; Vol. 1, pp 27-30.

95. Flotats, X.; Campos, E.; Palatsi, J.; Bonmatí, A. [Anaerobic digestion of swine liquid manures and co-digestion with residues of food industry]. *Porci (España)* 2001.

96. Departamento Administrativo Nacional de Estadística –DANE Dirección de Metodología y Producción Estadística - DIMPE Encuesta Nacional Agropecuaria ENA Santander.

97. Camara de Comercio Bucaramanga Sector Agrícola Santander. http://www.camaradirecta.com/temas/documentos%20pdf/informes%20de%20actualidad/2014/agricola_2013.pdf.

98. Departamento Administrativo Nacional de Estadística DANE Cuenta satélite piloto de la agroindustria. http://www.dane.gov.co/files/investigaciones/pib/agroindustria/Marco_central_agroindustria.pdf?phpMyAdmin=a9ticq8rv198vhk5e8cck52r11.

99. Instituto Colombiano Agropecuario ICA Censo Pecuario Nacional. <http://www.ica.gov.co/getdoc/8232c0e5-be97-42bd-b07b-9cdbfb07fcac/Censos-2008.aspx>.

100. FEDEPALMA La Palma de Aceite en Colombia. <http://web.fedepalma.org/la-palma-de-aceite-en-colombia-departamentos>.

101. Fenavi - FONAV; Fernando Ávila, Director Programa Económico BALANCE AVÍCOLA 2015 Y EXPECTATIVAS 2016. [http://www.fenavi.org/images/stories/estadisticas/article/3295/Avicultores234_Balance%20\(1\).pdf](http://www.fenavi.org/images/stories/estadisticas/article/3295/Avicultores234_Balance%20(1).pdf).

102. Contreras, N. E. R.; Ramírez, Á S. S.; González, E. M. G.; Angarita, E. E. Y. Caracterización y manejo de subproductos del beneficio del fruto de palma de aceite. *Boletines técnicos* 2011, 46.

103. García, J. A.; Yañez, E. E. Generación y uso de biomasa en plantas de beneficio de palma de aceite en Colombia. *Revista Palmas* 2010, 31, 41-48.

104. Hossain, M. A.; Jewaratnam, J.; Ganesan, P. Prospect of hydrogen production from oil palm biomass by thermochemical process – A review. *Int J Hydrogen Energy* .

105. Trihartono, A.; Mclellan, B.; Oramahi, H. A.; Wahdina,; Diba, F.; Nurhaida,; Yoshimura, T. The 5th Sustainable Future for Human Security (Sustain 2014) Optimization of Production of Lignocellulosic Biomass Bio-oil from Oil Palm Trunk. *Procedia Environmental Sciences* 2015, 28, 769-777.

106. Abnisa, F.; Daud W.M.A. Wan, W. M. A. W.; Husin, W. N. W.; Sahu, J. N. Utilization possibilities of palm shell as a source of biomass energy in Malaysia by producing bio-oil in pyrolysis process. *Biomass Bioenergy* 2011, 35, 1863-1872.

107. Shinoj, S.; Visvanathan, R.; Panigrahi, S.; Kochubabu, M. Oil palm fiber (OPF) and its composites: A review. *Ind. Crops Prod.* 2011, 33, 7-22.

108. Águila, I.; Sosa, M. Evaluación físico química de cenizas de cascarilla de arroz, bagazo de caña y hoja de maíz y su influencia en mezclas de mortero, como

- materiales puzolánicos. /Physical Chemical Evaluation of Rice Husks, Corn Leaves and Cane Bagasse Ashes and their Potent. *Revista de la Facultad de Ingeniería Universidad Central de Venezuela* 2013, 23, 55-66.
109. Díaz, R. Caracterización Energética del Bagazo de Caña de Azúcar del Ingenio Valdez. Ecuador. *CARBON* 2008, 24, 23.52.
110. Murillo, R.; Antonio, Y.; Castro Gomez, A. E.; Mendoza Camacho, M. L.; Saavedra, J. Análisis técnico-económico de la generación de energía eléctrica con combustible no convencional (bagazo de caña) en el ingenio la troncal. 2006.
111. Abu Bakar, R. b.; Froome, C.; Daniyanto,; Sutidjan,; Deendarlianto,; Budiman, A. 2nd International Conference on Sustainable Energy Engineering and Application (ICSEEA) 2014 Sustainable Energy for Green Mobility Torrefaction of Indonesian Sugar-cane Bagasse to Improve Bio-syngas Quality for Gasification Process. *Energy Procedia* 2015, 68, 157-166.
112. Riaño, A. M. S. Producción de bioetanol a partir de subproductos agroindustriales lignocelulósicos. *Revista Tumbaga* 2010, 1.
113. de Desarrollo, BID Banco Interamericano “Evaluación del ciclo de vida de la cadena de producción de biocombustibles en Colombia”.
114. Márquez Coronel, A. J.; Salazar Román, E. J. Análisis de los niveles de desperdicio del mucílago de cacao y su aprovechamiento como alternativa de biocombustible. 2015.
115. PUERTA, G.; RIOS, S. Composición química del mucílago de café según el tiempo de fermentación y refrigeración. 2014.
116. Sadeghian, S.; Mejía, B.; Arcila, J. Composición elemental de frutos de café y extracción de nutrientes por la cosecha en la zona cafetera de Colombia. 2007.
117. Caicedo M. L M*, y Chavarriaga M. W** Efecto de la aplicación de dosis de silicio sobre el desarrollo en almácigo de plántulas de café variedad Colombia.
118. RODRIGUEZ, N. Producción de alcohol a partir de la pulpa de café. 2015.
119. Vargas-Machuca, R. N. Vermicompostaje en el reciclado de residuos agroindustriales. 2010.
120. Herrera Carrillo, G. E. Producción de biogás a partir de desechos de bovinos como una alternativa de energía renovable. 2010.
121. Vásquez, E. B. *Guía para compostaje y manejo de suelos*; Siglo Del Hombre Editores SA: 2003; .
122. Arce, J.; Rojas-Bourrillón, A.; Poore, M. Efecto de la adición de pollinaza sobre las características nutricionales y fermentativas del ensilado de subproductos agroindustriales de yuca (*Manihot esculenta*). *Agronomía costarricense: Revista de ciencias agrícolas* 2015, 39, 131-140.
123. Oudart, D.; Robin, P.; Paillat, J. M.; Paul, E. Modelling nitrogen and carbon interactions in composting of animal manure in naturally aerated piles. *Waste Manage.* 2015, 46, 588-598.
124. Granada, E. V.; Artunduaga, W.; Gordillo, L. A. Recuperación parcial del concentrado de la porquinaza, una alternativa ambiental y económica. *Revista Ingeniería y Región* 2009, 6, 53-60.

125. Parra Parra, C. C.; Martínez Sánchez, J. J.; Rincón Cusba, J. F. Utilización de porquinaza en dos niveles de inclusión, como suplemento alimenticio en la etapa de finalización en el periodo de engorde en Ovinos. 2012.
126. airo Alexander, Jairo Alexander Osorio Saraz; Saraz1111, O.; José, Héctor José Ciro Velásquez Héctor; Velásquez2222y, C.; Sánchez3333, H. G. Evaluación de un sistema de biodigestión en serie para clima frío. *Rev.Fac.Nal.Agr.Medellín.Vol* , 60, 4145-4162.2007.
127. Viñals-Verde, M.; Bell-García, A.; Michelena-Álvarez, G.; Ramil-Mesa, M. Obtención de etanol a partir de biomasa lignocelulósica. 2012.
128. Valdez-Vazquez, I.; Ríos-Leal, E.; Esparza-García, F.; Cecchi, F.; Poggi-Varaldo, H. M. Semi-continuous solid substrate anaerobic reactors for H₂ production from organic waste: Mesophilic versus thermophilic regime. *Int J Hydrogen Energy* 2005, 30, 1383-1391.
129. Chang, V. S.; Holtzapple, M. T. In *In Fundamental factors affecting biomass enzymatic reactivity*; Twenty-first symposium on biotechnology for fuels and chemicals; Springer: 2000; , pp 5-37.
130. Koullas, D.; Christakopoulos, P.; Kekos, D.; Macris, B.; Koukios, E. Correlating the effect of pretreatment on the enzymatic hydrolysis of straw. *Biotechnol. Bioeng.* 1992, 39, 113-116.
131. Ghimire, A.; Frunzo, L.; Pontoni, L.; d'Antonio, G.; Lens, P. N. L.; Esposito, G.; Pirozzi, F. Dark fermentation of complex waste biomass for biohydrogen production by pretreated thermophilic anaerobic digestate. *J. Environ. Manage.* 2015, 152, 43-48.
132. Ozkan, L.; Erguder, T. H.; Demirer, G. N. Effects of pretreatment methods on solubilization of beet-pulp and bio-hydrogen production yield. *Int J Hydrogen Energy* 2011, 36, 382-389.
133. Fan, Y.; Zhang, Y.; Zhang, S.; Hou, H.; Ren, B. Efficient conversion of wheat straw wastes into biohydrogen gas by cow dung compost. *Bioresour. Technol.* 2006, 97, 500-505.
134. Guo, X. M.; Trably, E.; Latrille, E.; Carrere, H.; Steyer, J. Predictive and explicative models of fermentative hydrogen production from solid organic waste: Role of butyrate and lactate pathways. *Int J Hydrogen Energy* 2014, 39, 7476-7485.
135. Pattra, S.; Sangyoka, S.; Boonmee, M.; Reungsang, A. Bio-hydrogen production from the fermentation of sugarcane bagasse hydrolysate by *Clostridium butyricum*. *Int J Hydrogen Energy* 2008, 33, 5256-5265.
136. Tang, G.; Huang, J.; Sun, Z.; Tang, Q.; Yan, C.; Liu, G. Biohydrogen production from cattle wastewater by enriched anaerobic mixed consortia: Influence of fermentation temperature and pH. *Journal of Bioscience and Bioengineering* 2008, 106, 80-87.
137. Valdez-Vazquez, I.; Ríos-Leal, E.; Esparza-García, F.; Cecchi, F.; Poggi-Varaldo, H. M. Semi-continuous solid substrate anaerobic reactors for H₂ production from organic waste: Mesophilic versus thermophilic regime. *Int J Hydrogen Energy* 2005, 30, 1383-1391.

138. Lee, Z.; Li, S.; Kuo, P.; Chen, I. -.; Tien, Y.; Huang, Y.; Chuang, C.; Wong, S.; Cheng, S. Thermophilic bio-energy process study on hydrogen fermentation with vegetable kitchen waste. *Int J Hydrogen Energy* 2010, 35, 13458-13466.
139. Chen, C.; Chuang, Y.; Lin, C.; Lay, C.; Sen, B. Thermophilic dark fermentation of untreated rice straw using mixed cultures for hydrogen production. *Int J Hydrogen Energy* 2012, 37, 15540-15546.
140. Kargi, F.; Eren, N. S.; Ozmihci, S. Bio-hydrogen production from cheese whey powder (CWP) solution: Comparison of thermophilic and mesophilic dark fermentations. *Int J Hydrogen Energy* 2012, 37, 8338-8342.
141. Chairattanananokorn, P.; Penthamkeerati, P.; Reungsang, A.; Lo, Y.; Lu, W.; Chang, J. Production of biohydrogen from hydrolyzed bagasse with thermally preheated sludge. *Int J Hydrogen Energy* 2009, 34, 7612-7617.
142. Luo, G.; Xie, L.; Zou, Z.; Zhou, Q.; Wang, J. Fermentative hydrogen production from cassava stillage by mixed anaerobic microflora: Effects of temperature and pH. *Appl. Energy* 2010, 87, 3710-3717.
143. Kotsopoulos, T. A.; Fotidis, I. A.; Tsolakis, N.; Martzopoulos, G. G. Biohydrogen production from pig slurry in a CSTR reactor system with mixed cultures under hyper-thermophilic temperature (70 °C). *Biomass Bioenergy* 2009, 33, 1168-1174.
144. A. Bedoya, J.C. Castrillón, J. E. Ramirez, J.E. Vasquez, M. Arias Zabala Producción biológica de hidrógeno: una aproximación al estado del arte. *Dyna*, año 75. 2007, 154, 137-157.
145. Argun, H.; Kargi, F. Bio-hydrogen production by different operational modes of dark and photo-fermentation: an overview. *Int J Hydrogen Energy* 2011, 36, 7443-7459.
146. Shin, J.; Yoon, J. H.; Ahn, E. K.; Kim, M.; Sim, S. J.; Park, T. H. Fermentative hydrogen production by the newly isolated *Enterobacter asburiae* SNU-1. *Int J Hydrogen Energy* 2007, 32, 192-199.
147. Xia, A.; Cheng, J.; Ding, L.; Lin, R.; Song, W.; Su, H.; Zhou, J.; Cen, K. Substrate consumption and hydrogen production via co-fermentation of monomers derived from carbohydrates and proteins in biomass wastes. *Appl. Energy* 2015, 139, 9-16.
148. Duff, S. J.; Murray, W. D. Bioconversion of forest products industry waste cellulose to fuel ethanol: a review. *Bioresour. Technol.* 1996, 55, 1-33.
149. Domínguez, M. M. D.; Alvarez-Castillo, A.; Castrejón-Rosales, T.; Baeza, M. J. G.; Campos, F. J. H.; Octaviano, V. H. A.; Picazo, J. C. T. Estudio de la cinética de la hidrólisis ácida de bagazo de caña de azúcar sin pretratamiento para la obtención de azúcares reductores. *Revista Iberoamericana de Polímeros* 2011, 12, 153-159.
150. Hamelinck, C. N.; Van Hooijdonk, G.; Faaij, A. P. Ethanol from lignocellulosic biomass: techno-economic performance in short-, middle-and long-term. *Biomass Bioenergy* 2005, 28, 384-410.
151. Gírio, F. M.; Fonseca, C.; Carneiro, F.; Duarte, L. C.; Marques, S.; Bogel-Lukasik, R. Hemicelluloses for fuel ethanol: a review. *Bioresour. Technol.* 2010, 101, 4775-4800.

152. Brethauer, S.; Wyman, C. E. Review: continuous hydrolysis and fermentation for cellulosic ethanol production. *Bioresour. Technol.* 2010, *101*, 4862-4874.
153. Taherzadeh, M. J.; Karimi, K. Pretreatment of lignocellulosic wastes to improve ethanol and biogas production: a review. *International journal of molecular sciences* 2008, *9*, 1621-1651.
154. González, A. Hidrólisis enzimática de bagazo de caña; cinética y diseño preliminar de reactores. *Trabajo presentado en opción al título de Ingeniero Químico, Universidad industrial de Santander, Escuela de Ingeniería Química Bucaramanga* 2007.
155. Hernández, F. M. *Producción de biogás con suero de queso: Tratamiento y generación de energía renovable a partir de lactosuero*; Francisco M. Hernández: 2015; .
156. Robles, S. A.; Jansen, A. Estudio sobre el Valor Fertilizante de los Productos del Proceso" Fermentación Anaeróbica" para Producción de Biogás. *German Prof EC GmbH, Lima, Perú, BM-4-00-1108-1239* 2008.
157. Acosta, Y. L.; Abreu, M. C. O. La digestión anaerobia. Aspectos teóricos. Parte I. 2005.
158. K, M.; S, R.; M, H. Tesis de Ingeniería Ambiental. 2016.
159. MARRIEL, I.; Konzen, E.; Alvarenga, R.; Santos, H. d. Tratamento e utilização de resíduos orgânicos. *Informe Agropecuário, Belo Horizonte* 1987, *13*, 24-36.

ANEXOS

Anexo 1. Cálculos estequiométricos para la estimación de la producción teórica del hidrógeno a partir de celulosa ruta ácido acético

1. Bagazo de Palma de aceite

Base 1 tonelada = 1000 kg → 43% celulosa que equivale a 430 kg de celulosa.

Kg de glucosa = $430 \cdot \frac{\text{PM glucosa}}{\text{PM celulosa}} = 430 \cdot \frac{180}{162}$

PM celulosa 162

Que es lo mismo kg glucosa = $430 \cdot 1,11 = 477,77$ kg



Los kmol glucosa = $\frac{477,77}{180} = 2,6545$ kmol

180

1 Kmol glucosa → 4 kmol de H₂

2,6542 Kmol de glucosa → X

X = 10,617 kmol H₂ equivalentes a **10617 mol H₂**

Es decir = $10617 \cdot 2 \text{ gr} = 21234 \text{ gr de H}_2$

2. Bagazo de Caña de azúcar

Base 1 tonelada = 1000 kg → 48% celulosa que equivale a 480 kg de celulosa.

Kg de glucosa = $480 \cdot \frac{\text{PM glucosa}}{\text{PM celulosa}} = 480 \cdot \frac{180}{162}$

PM celulosa 162

Que es lo mismo kg glucosa = $480 \cdot 1,11 = 532,8$



Los kmol glucosa = $\frac{532,8}{180} = 2,96$ kmol

180

1 Kmol glucosa → 4 kmol de H₂

2,96 Kmol de glucosa → X

X = 11,84 kmol H₂ equivalentes a **11840 mol H₂**

Es decir = $11840 \cdot 2 \text{ gr} = 23680 \text{ gr de H}_2$

3. Mucilago de Cacao

Base 1 tonelada = 1000 kg → 50% celulosa que equivale a 500 kg de celulosa.

Kg de glucosa = $500 \cdot \frac{\text{PM glucosa}}{\text{PM celulosa}} = 500 \cdot \frac{180}{162}$

PM celulosa 162

Que es lo mismo kg glucosa = $500 \cdot 1,11 = 555,55$



Los kmol glucosa = $\frac{555,55}{180} = 3,08$ kmol

180

1 Kmol glucosa → 4 kmol de H₂

3,08 Kmol de glucosa → X

X = 12,32 kmol H₂ equivalentes a **12320 mol H₂**

Es decir = $12320 \cdot 2 \text{ gr} = 24640 \text{ gr de H}_2$

4. Mucilago de Café

Base 1 tonelada = 1000 kg → 30% celulosa que equivale a 300 kg de celulosa.

Kg de glucosa = 300 * PM glucosa = 300 * 180

PM celulosa 162

Que es lo mismo kg glucosa = 300 * 1,11 = 333,33



Los kmol glucosa = 333,33 = 1,85 kmol

180

1 Kmol glucosa → 4 kmol de H₂

1,85 Kmol de glucosa → X

X = 7,40 kmol H₂ equivalentes a **7407 mol H₂**

Es decir = 7407 * 2 gr = 14814 gr de H₂

5. Caprinaza

Base 1 tonelada = 1000 kg → 11% celulosa que equivale a 110 kg de celulosa.

Kg de glucosa = 110 * PM glucosa = 110 * 180

PM celulosa 162

Que es lo mismo kg glucosa = 110 * 1,11 = 122,22



Los kmol glucosa = 122,22 = 0,67 kmol

180

1 Kmol glucosa → 4 kmol de H₂

0,67 Kmol de glucosa → X

X = 2,71 kmol H₂ equivalentes a **2716 mol H₂**

Es decir = 2716 * 2 gr = 5432 gr de H₂

6. Gallinaza

Base 1 tonelada = 1000 kg → 15% celulosa que equivale a 150 kg de celulosa.

Kg de glucosa = 150 * PM glucosa = 150 * 180

PM celulosa 162

Que es lo mismo kg glucosa = 150 * 1,11 = 166,66



Los kmol glucosa = 166,66 = 0,92 kmol

180

1 Kmol glucosa → 4 kmol de H₂

0,92 Kmol de glucosa → X

X = 3,68 kmol H₂ equivalentes a **3680 mol H₂**

Es decir = 3680 * 2 gr = 7360 gr de H₂

7. Porcinaza

Base 1 tonelada = 1000 kg → 7% celulosa que equivale a 70 kg de celulosa.

Kg de glucosa = 70 * PM glucosa = 70 * 180

PM celulosa 162

Que es lo mismo kg glucosa = 70 * 1,11 = 77,77



Los kmol glucosa = 77,77 = 0,43 kmol

180

1 Kmol glucosa → 4 kmol de H₂

0,43 Kmol de glucosa → X

X = 1,72 kmol H₂ equivalentes a **1728 mol H₂**

Es decir = 1728 * 2 gr = 3456,44 gr de H₂

8. Bovinaza

Base 1 tonelada = 1000 kg → 52% celulosa que equivale a 520 kg de celulosa.

Kg de glucosa = 520 * PM glucosa = 520 * 180

PM celulosa 162

Que es lo mismo kg glucosa = 520 * 1,11 = 577,77



Los kmol glucosa = 577,77 = 3,20 kmol

180

1 Kmol glucosa → 4 kmol de H₂

3,20 Kmol de glucosa → X

X = 12,83 kmol H₂ equivalentes a **12839 mol H₂**

Es decir = 12839 * 2 gr = 25679 gr de H₂

Anexo 2. Cálculos estequiométricos para la estimación de la producción teórica del hidrógeno a partir de celulosa ruta ácido butírico

1. Bagazo de Palma de aceite

Base 1 tonelada = 1000 kg → 43% celulosa que equivale a 430 kg de celulosa.

Kg de glucosa = $430 \cdot \frac{\text{PM glucosa}}{\text{PM celulosa}} = 430 \cdot \frac{180}{162}$

PM celulosa 162

Que es lo mismo kg glucosa = $430 \cdot 1,11 = 477,77$ kg



Los kmol glucosa = $\frac{477,77}{180} = 2,6545$ kmol

180

1 Kmol glucosa → 2 kmol de H₂

2,6542 Kmol de glucosa → X

X = 5.3084 kmol H₂ equivalentes a **5308 mol H₂**

Es decir = $5308 \cdot 2 \text{ gr} = 10617 \text{ gr de H}_2$

2. Bagazo de Caña de azúcar

Base 1 tonelada = 1000 kg → 48% celulosa que equivale a 480 kg de celulosa.

Kg de glucosa = $480 \cdot \frac{\text{PM glucosa}}{\text{PM celulosa}} = 480 \cdot \frac{180}{162}$

PM celulosa 162

Que es lo mismo kg glucosa = $480 \cdot 1,11 = 532,8$



Los kmol glucosa = $\frac{532,8}{180} = 2,96$ kmol

180

1 Kmol glucosa → 2 kmol de H₂

2,96 Kmol de glucosa → X

X = 5,92 kmol H₂ equivalentes a **5920 mol H₂**

Es decir = $5,92 \cdot 2 \text{ gr} = 11,84 \text{ gr de H}_2$

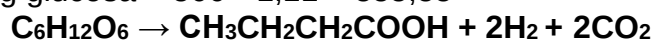
3. Mucilago de Cacao

Base 1 tonelada = 1000 kg → 50% celulosa que equivale a 500 kg de celulosa.

Kg de glucosa = $500 \cdot \frac{\text{PM glucosa}}{\text{PM celulosa}} = 500 \cdot \frac{180}{162}$

PM celulosa 162

Que es lo mismo kg glucosa = $500 \cdot 1,11 = 555,55$



Los kmol glucosa = $\frac{555,55}{180} = 3,08$ kmol

180

1 Kmol glucosa → 2 kmol de H₂

3,08 Kmol de glucosa → X

X = 6,16 kmol H₂ equivalentes a **6160 mol H₂**

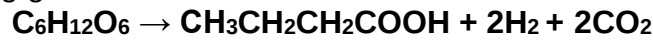
Es decir = $6160 \cdot 2 \text{ gr} = 12320 \text{ gr de H}_2$

4. Mucilago de Café

Base 1 tonelada = 1000 kg → 30% celulosa que equivale a 300 kg de celulosa.

$$\begin{array}{l} \text{Kg de glucosa} = 300 * \text{PM glucosa} = 300 * 180 \\ \text{PM celulosa} \qquad \qquad \qquad 162 \end{array}$$

$$\text{Que es lo mismo kg glucosa} = 300 * 1,11 = 333,33$$



$$\begin{array}{l} \text{Los kmol glucosa} = 333,33 = 1,85 \text{ kmol} \\ 180 \end{array}$$

$$1 \text{ Kmol glucosa} \rightarrow 2 \text{ kmol de H}_2$$

$$1,85 \text{ Kmol de glucosa} \rightarrow \text{X}$$

$$\text{X} = 3,7 \text{ kmol H}_2 \text{ equivalentes a } \mathbf{3700 \text{ mol H}_2}$$

$$\text{Es decir} = 3700 * 2 \text{ gr} = 7400 \text{ gr de H}_2$$

5. Caprinaza

Base 1 tonelada = 1000 kg → 11% celulosa que equivale a 110 kg de celulosa.

$$\begin{array}{l} \text{Kg de glucosa} = 110 * \text{PM glucosa} = 110 * 180 \\ \text{PM celulosa} \qquad \qquad \qquad 162 \end{array}$$

$$\text{Que es lo mismo kg glucosa} = 110 * 1,11 = 122,22$$



$$\begin{array}{l} \text{Los kmol glucosa} = 122,22 = 0,67 \text{ kmol} \\ 180 \end{array}$$

$$1 \text{ Kmol glucosa} \rightarrow 2 \text{ kmol de H}_2$$

$$0,67 \text{ Kmol de glucosa} \rightarrow \text{X}$$

$$\text{X} = 1,34 \text{ kmol H}_2 \text{ equivalentes a } \mathbf{1340 \text{ mol H}_2}$$

$$\text{Es decir} = 1340 * 2 \text{ gr} = 2680 \text{ gr de H}_2$$

6. Gallinaza

Base 1 tonelada = 1000 kg → 15% celulosa que equivale a 150 kg de celulosa.

$$\begin{array}{l} \text{Kg de glucosa} = 150 * \text{PM glucosa} = 150 * 180 \\ \text{PM celulosa} \qquad \qquad \qquad 162 \end{array}$$

$$\text{Que es lo mismo kg glucosa} = 150 * 1,11 = 166,66$$



$$\begin{array}{l} \text{Los kmol glucosa} = 166,66 = 0,92 \text{ kmol} \\ 180 \end{array}$$

$$1 \text{ Kmol glucosa} \rightarrow 2 \text{ kmol de H}_2$$

$$0,92 \text{ Kmol de glucosa} \rightarrow \text{X}$$

$$\text{X} = 1,84 \text{ kmol H}_2 \text{ equivalentes a } \mathbf{1840 \text{ mol H}_2}$$

$$\text{Es decir} = 1840 * 2 \text{ gr} = 3680 \text{ gr de H}_2$$

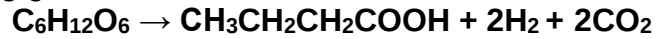
7. Porcinaza

Base 1 tonelada = 1000 kg → 7% celulosa que equivale a 70 kg de celulosa.

Kg de glucosa = 70 * PM glucosa = 70 * 180

PM celulosa 162

Que es lo mismo kg glucosa = 70 * 1,11 = 77,77



Los kmol glucosa = 77,77 = 0,43 kmol

180

1 Kmol glucosa → 2 kmol de H₂

0,43 Kmol de glucosa → X

X = 0,86 kmol H₂ equivalentes a 860 mol H₂

Es decir = 860 * 2 gr = 1720 gr de H₂

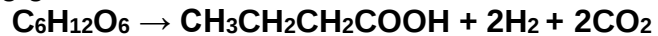
8. Bovinaza

Base 1 tonelada = 1000 kg → 52% celulosa que equivale a 520 kg de celulosa.

Kg de glucosa = 520 * PM glucosa = 520 * 180

PM celulosa 162

Que es lo mismo kg glucosa = 520 * 1,11 = 577,77



Los kmol glucosa = 577,77 = 3,20 kmol

180

1 Kmol glucosa → 2 kmol de H₂

3,20 Kmol de glucosa → X

X = 6,4 kmol H₂ equivalentes a 6400 mol H₂

Es decir = 6400 * 2 gr = 12800 gr de H₂

Anexo 3. Cálculos estequiométricos para la estimación de la producción teórica del hidrógeno a partir de hemicelulosa ruta ácido acético

1. Bagazo de palma de aceite y mucilago de cacao

Base 1 tonelada = 1000 kg → 22% hemicelulosa que equivale a 220 kg de hemicelulosa.

$$\text{Kg de xilosa} = 220 * \frac{\text{PM xilosa}}{\text{PM hemicelulosa}} = 220 * \frac{150}{132}$$

$$\text{Que es lo mismo kg xilosa} = 220 * 1,13 = 250$$



$$\text{Los kmol xilosa} = \frac{250}{150} = 1,66 \text{ kmol}$$

$$3 \text{ Kmol xilosa} \rightarrow 10 \text{ kmol de H}_2$$

$$1,66 \text{ Kmol de xilosa} \rightarrow X$$

$$X = 5,53 \text{ kmol H}_2 \text{ equivalentes a } 5533 \text{ mol H}_2$$

$$\text{Es decir} = 5533 * 2 \text{ gr} = 11066 \text{ gr de H}_2$$

2. Bagazo de caña de azúcar

Base 1 tonelada = 1000 kg → 23% hemicelulosa que equivale a 230 kg de hemicelulosa.

$$\text{Kg de xilosa} = 230 * \frac{\text{PM xilosa}}{\text{PM hemicelulosa}} = 230 * \frac{150}{132}$$

$$\text{Que es lo mismo kg xilosa} = 230 * 1,13 = 260$$



$$\text{Los kmol xilosa} = \frac{260}{150} = 1,73 \text{ kmol}$$

$$3 \text{ Kmol xilosa} \rightarrow 10 \text{ kmol de H}_2$$

$$1,73 \text{ Kmol de xilosa} \rightarrow X$$

$$X = 5,77 \text{ kmol H}_2 \text{ equivalentes a } 5777 \text{ mol H}_2$$

$$\text{Es decir} = 5777 * 2 \text{ gr} = 11555 \text{ gr de H}_2$$

3. Mucilago de café

Base 1 tonelada = 1000 kg → 5% hemicelulosa que equivale a 50 kg de hemicelulosa.

$$\text{Kg de xilosa} = 50 * \frac{\text{PM xilosa}}{\text{PM hemicelulosa}} = 50 * \frac{150}{132}$$

$$\text{Que es lo mismo kg xilosa} = 50 * 1,13 = 56,5$$



$$\text{Los kmol xilosa} = \frac{56,5}{150} = 0,37 \text{ kmol}$$

$$3 \text{ Kmol xilosa} \rightarrow 10 \text{ kmol de H}_2$$

$$0,37 \text{ Kmol de xilosa} \rightarrow X$$

$$X = 1,23 \text{ kmol H}_2 \text{ equivalentes a } 1230 \text{ mol H}_2$$

$$\text{Es decir} = 1230 * 2 \text{ gr} = 2460 \text{ gr de H}_2$$

4. Caprinaza

Base 1 tonelada = 1000 kg → 11% hemicelulosa que equivale a 110 kg de hemicelulosa.

$$\text{Kg de xilosa} = 110 \cdot \frac{\text{PM xilosa}}{\text{PM hemicelulosa}} = 110 \cdot \frac{150}{132}$$

Que es lo mismo kg xilosa = $110 \cdot 1,13 = 124,3$



$$\text{Los kmol xilosa} = \frac{124,3}{150} = 0,82 \text{ kmol}$$

$$3 \text{ Kmol xilosa} \rightarrow 10 \text{ kmol de H}_2$$

$$0,82 \text{ Kmol de xilosa} \rightarrow X$$

$$X = 2,76 \text{ kmol H}_2 \text{ equivalentes a } 2762 \text{ mol H}_2$$

$$\text{Es decir} = 2762 \cdot 2 \text{ gr} = 5524 \text{ gr de H}_2$$

5. Gallinaza

Base 1 tonelada = 1000 kg → 19% hemicelulosa que equivale a 190 kg de hemicelulosa.

$$\text{Kg de xilosa} = 190 \cdot \frac{\text{PM xilosa}}{\text{PM hemicelulosa}} = 190 \cdot \frac{150}{132}$$

Que es lo mismo kg xilosa = $190 \cdot 1,13 = 214,7$



$$\text{Los kmol xilosa} = \frac{214,7}{150} = 1,43 \text{ kmol}$$

$$3 \text{ Kmol xilosa} \rightarrow 10 \text{ kmol de H}_2$$

$$1,43 \text{ Kmol de xilosa} \rightarrow X$$

$$X = 4,77 \text{ kmol H}_2 \text{ equivalentes a } 4771 \text{ mol H}_2$$

$$\text{Es decir} = 4771 \cdot 2 \text{ gr} = 9542 \text{ gr de H}_2$$

6. Porcinaza

Base 1 tonelada = 1000 kg → 20% hemicelulosa que equivale a 200 kg de hemicelulosa.

$$\text{Kg de xilosa} = 200 \cdot \frac{\text{PM xilosa}}{\text{PM hemicelulosa}} = 200 \cdot \frac{150}{132}$$

Que es lo mismo kg xilosa = $200 \cdot 1,13 = 226$



$$\text{Los kmol xilosa} = \frac{226}{150} = 1,50 \text{ kmol}$$

$$3 \text{ Kmol xilosa} \rightarrow 10 \text{ kmol de H}_2$$

$$1,50 \text{ Kmol de xilosa} \rightarrow X$$

$$X = 5 \text{ kmol H}_2 \text{ equivalentes a } 5000 \text{ mol H}_2$$

$$\text{Es decir} = 5000 \cdot 2 \text{ gr} = 10000 \text{ gr de H}_2$$

7. Bovinaza

Base 1 tonelada = 1000 kg → 2% hemicelulosa que equivale a 20 kg de hemicelulosa.

Kg de xilosa = 20 * PM xilosa = 20 * 150

PM hemicelulosa 132

Que es lo mismo kg xilosa = 20 * 1,13 = 22,6



Balanceando



Los kmol xilosa = 22,6 = 0,15 kmol

150

3 Kmol xilosa → 10 kmol de H₂

0,15 Kmol de xilosa → X

X = 0,5 kmol H₂ equivalentes a 500 mol H₂

Es decir = 500 * 2 gr = 1000 gr de H₂

Anexo 4. Cálculos estequiométricos para la estimación de la producción teórica del hidrógeno a partir de hemicelulosa ruta ácido butírico

1. Bagazo de palma de aceite y mucilago de cacao

Base 1 tonelada = 1000 kg → 22% hemicelulosa que equivale a 220 kg de hemicelulosa.

$$\text{Kg de xilosa} = 220 * \frac{\text{PM xilosa}}{\text{PM hemicelulosa}} = 220 * \frac{150}{132}$$

$$\text{Que es lo mismo kg xilosa} = 220 * 1,13 = 250$$



$$\text{Los kmol xilosa} = \frac{250}{150} = 1,66 \text{ kmol}$$

$$6 \text{ Kmol xilosa} \rightarrow 10 \text{ kmol de H}_2$$

$$1,66 \text{ Kmol de xilosa} \rightarrow X$$

$$X = 2,76 \text{ kmol H}_2 \text{ equivalentes a } 2760 \text{ mol H}_2$$

$$\text{Es decir} = 2760 * 2 \text{ gr} = 5520 \text{ gr de H}_2$$

2. Bagazo de caña de azúcar

Base 1 tonelada = 1000 kg → 23% hemicelulosa que equivale a 230 kg de hemicelulosa.

$$\text{Kg de xilosa} = 230 * \frac{\text{PM xilosa}}{\text{PM hemicelulosa}} = 230 * \frac{150}{132}$$

$$\text{Que es lo mismo kg xilosa} = 230 * 1,13 = 260$$



$$\text{Los kmol xilosa} = \frac{260}{150} = 1,73 \text{ kmol}$$

$$6 \text{ Kmol xilosa} \rightarrow 10 \text{ kmol de H}_2$$

$$1,73 \text{ Kmol de xilosa} \rightarrow X$$

$$X = 2,88 \text{ kmol H}_2 \text{ equivalentes a } 2880 \text{ mol H}_2$$

$$\text{Es decir} = 2880 * 2 \text{ gr} = 5760 \text{ gr de H}_2$$

3. Mucilago de café

Base 1 tonelada = 1000 kg → 5% hemicelulosa que equivale a 50 kg de hemicelulosa.

$$\text{Kg de xilosa} = 50 * \frac{\text{PM xilosa}}{\text{PM hemicelulosa}} = 50 * \frac{150}{132}$$

$$\text{Que es lo mismo kg xilosa} = 50 * 1,13 = 56,5$$



$$\text{Los kmol xilosa} = \frac{56,5}{150} = 0,37 \text{ kmol}$$

$$6 \text{ Kmol xilosa} \rightarrow 10 \text{ kmol de H}_2$$

$$0,37 \text{ Kmol de xilosa} \rightarrow X$$

$$X = 0,61 \text{ kmol H}_2 \text{ equivalentes a } 610 \text{ mol H}_2$$

$$\text{Es decir} = 610 * 2 \text{ gr} = 1220 \text{ gr de H}_2$$

4. Caprinaza

Base 1 tonelada = 1000 kg → 11% hemicelulosa que equivale a 110 kg de hemicelulosa.

$$\text{Kg de xilosa} = 110 * \frac{\text{PM xilosa}}{\text{PM hemicelulosa}} = 110 * \frac{150}{132}$$

Que es lo mismo kg xilosa = $110 * 1,13 = 124,3$



$$\text{Los kmol xilosa} = \frac{124,3}{150} = 0,82 \text{ kmol}$$

$$6 \text{ Kmol xilosa} \rightarrow 10 \text{ kmol de H}_2$$

$$0,82 \text{ Kmol de xilosa} \rightarrow X$$

$$X = 1,36 \text{ kmol H}_2 \text{ equivalentes a } 1360 \text{ mol H}_2$$

$$\text{Es decir} = 1360 * 2 \text{ gr} = 2720 \text{ gr de H}_2$$

5. Gallinaza

Base 1 tonelada = 1000 kg → 19% hemicelulosa que equivale a 190 kg de hemicelulosa.

$$\text{Kg de xilosa} = 190 * \frac{\text{PM xilosa}}{\text{PM hemicelulosa}} = 190 * \frac{150}{132}$$

Que es lo mismo kg xilosa = $190 * 1,13 = 214,7$



$$\text{Los kmol xilosa} = \frac{214,7}{150} = 1,43 \text{ kmol}$$

$$6 \text{ Kmol xilosa} \rightarrow 10 \text{ kmol de H}_2$$

$$1,43 \text{ Kmol de xilosa} \rightarrow X$$

$$X = 2,38 \text{ kmol H}_2 \text{ equivalentes a } 2380 \text{ mol H}_2$$

$$\text{Es decir} = 2380 * 2 \text{ gr} = 4760 \text{ gr de H}_2$$

6. Porcinaza

Base 1 tonelada = 1000 kg → 20% hemicelulosa que equivale a 200 kg de hemicelulosa.

$$\text{Kg de xilosa} = 200 * \frac{\text{PM xilosa}}{\text{PM hemicelulosa}} = 200 * \frac{150}{132}$$

Que es lo mismo kg xilosa = $200 * 1,13 = 226$



$$\text{Los kmol xilosa} = \frac{226}{150} = 1,50 \text{ kmol}$$

$$6 \text{ Kmol xilosa} \rightarrow 10 \text{ kmol de H}_2$$

$$1,50 \text{ Kmol de xilosa} \rightarrow X$$

$$X = 2,5 \text{ kmol H}_2 \text{ equivalentes a } 2500 \text{ mol H}_2$$

$$\text{Es decir} = 2500 * 2 \text{ gr} = 5000 \text{ gr de H}_2$$

7. Bovinaza

Base 1 tonelada = 1000 kg → 2% hemicelulosa que equivale a 20 kg de hemicelulosa.

$$\text{Kg de xilosa} = 20 * \frac{\text{PM xilosa}}{\text{PM hemicelulosa}} = 20 * \frac{150}{132}$$

Que es lo mismo kg xilosa = $20 * 1,13 = 22,6$



$$\text{Los kmol xilosa} = \frac{22,6}{150} = 0,15 \text{ kmol}$$

$$6 \text{ Kmol xilosa} \rightarrow 10 \text{ kmol de H}_2$$

$$0,15 \text{ Kmol de xilosa} \rightarrow X$$

$$X = 0,25 \text{ kmol H}_2 \text{ equivalentes a } 250 \text{ mol H}_2$$

$$\text{Es decir} = 250 * 2 \text{ gr} = 500 \text{ gr de H}_2$$