

DISEÑO CONCEPTUAL DE UNA PLANTA DE PRODUCCIÓN DE BIOETANOL A
PARTIR DEL RASTROJO DE MAÍZ EN EL DEPARTAMENTO DE
CUNDINAMARCA

GABRIEL DAVID BETANCOURT BASALLO
SERGIO NICOLÁS ROMERO ROMERO

Proyecto integral de grado para optar al título de
INGENIERO EN ENERGÍAS

Director
Libardo Enrique Mendoza Geney.
Ingeniero Mecánico.

FUNDACIÓN UNIVERSIDAD DE AMÉRICA
FACULTAD DE INGENIERÍAS
PROGRAMA DE INGENIERÍA EN ENERGÍAS
BOGOTÁ
2022

NOTA DE ACEPTACION

Firma del Director

Libardo Enrique Mendoza Geney.

Firma del Jurado

Ing. Libardo Enrique Mendoza Geney

Dra. Stefanía Betancur Márquez

Firma Jurado

Ing. Nelson Fernández Barrero

Firma Jurado

Bogotá D.C. Agosto de 2022

DIRECTIVOS DE LA UNIVERSIDAD

Presidente de la Universidad y Rector del Claustro

Dr. MARIO POSADA GARCÍA-PEÑA

Consejero institucional

Dr. LUIS JAIME POSADA GARCÍA-PEÑA

Vicerrectora Académica y de Investigaciones

Dra. ALEXANDRA MEJÍA GUZMÁN

Vicerrector Administrativo y Financiero

Dr. RICARDO ALFONSO PEÑARANDA CASTRO

Secretario General

Dr. JOSE LUIS MACIAS RODRIGUEZ

Decano de la Facultad de ingeniería

Dr. NALINY PATRICIA GUERRA PRIETO

Director de Programa de ingeniería en energías

Dr. JUAN CARLOS RODRÍGUEZ ESPARZA

DEDICATORIA

Este trabajo está dedicado a mi familia, la cual siempre me ha dado la fuerza y el impulso para formarme como un mejor profesional, recibiendo su apoyo incondicional y formación que definen la persona que hoy soy. A Dios por todas las bendiciones que me brinda a diario, por permitirme cumplir una meta más y por ser mi guía en todo momento.

A mis padres, abuelos, hermana, novia, amigos y demás personas allegadas a mí, les deseo el mismo éxito que desean en mi vida y demás logros por venir. Gracias, por todo su amor, entrega y esfuerzo para mi bienestar.

GABRIEL DAVID BETANCOURT BASALLO

A Dios por darme la oportunidad de vivir y por estar conmigo en cada paso que doy, por fortalecer mi corazón e iluminar mi mente y por haber puesto en mi camino a aquellas personas que han sido mi soporte y compañía durante los momentos difíciles

A mis hermanas y mi novia por apoyarme y ayudarme siempre que las necesité, a mis padres quienes fueron los encargados de guiarme todo el tiempo por el buen camino, porque estuvieron siempre pendientes de cómo estaba, como me iba y de que iba a hacer.

SERGIO NICOLÁS ROMERO ROMERO

AGRADECIMIENTOS

En primera instancia agradecemos a nuestros educadores, personas de gran sabiduría quienes se han esforzado por ayudarnos a lograr avanzar otro peldaño más en la vida.

Especialmente a nuestro orientador el ingeniero Libardo Enrique Mendoza Geney, un sincero agradecimiento. Quien nos ha guiado a lo largo de esta etapa y nos ha dado lecciones para la vida, que sabemos que en el momento de ejercer nuestro título profesional nos servirán para lograr una sana convivencia y una buena ética laboral.

Sencillo no ha sido el proceso, pero gracias a las ganas de transmitirnos sus conocimientos y dedicación, han logrado importantes objetivos como la culminación de este proyecto de grado con éxito y obtener una merecida titulación profesional.

Las directivas de la Universidad De América, los jurados calificadores y el cuerpo docente no son responsables por los criterios e ideas expuestas en el presente documento. Estos corresponden únicamente a los autores.

TABLA DE CONTENIDO

	pág.
1. GENERALIDADES	14
1.1 Materia prima	15
1.1.1 <i>Biomasa</i>	16
1.1.2 <i>Componentes de la biomasa lignocelulósica</i>	16
1.2 Procesos de producción de bioetanol	18
1.3 Bioetanol (propiedades, usos, ventajas, desventajas)	19
2. CARACTERIZACIÓN DE LA MATERIA PRIMA Y PRODUCCIÓN DEL RASTROJO DE MAIZ	23
2.1 Sector y ubicación	24
2.2 Producción	26
2.3 Análisis próximo, elemental	29
2.3.1 <i>Composición química</i>	30
2.3.2 <i>Análisis próximo</i>	30
2.3.3 <i>Análisis elemental</i>	31
2.3.4 <i>Poder calorífico</i>	32
3. INGENIERÍA CONCEPTUAL DE LA PLANTA	34
3.1 Descripción del proceso	34
3.1.1 <i>Pretratamiento</i>	34
3.1.2 <i>Fermentación</i>	36
3.1.3 <i>Separación</i>	36
3.2 Modelo de desarrollo	39
3.2.1 <i>Adsorción de enzimas</i>	39
3.3 Equipos	43
3.3.1 <i>Pretratamiento - Molino de bolas</i>	43
3.3.2 <i>Pretratamiento - Reactor de explosión a vapor</i>	43
3.3.3 <i>Fermentación - Tanque de Fermentación</i>	45
3.3.4 <i>Fermentación – Filtro tipo batch</i>	45
3.3.5 <i>Separación - Columna de destilación binaria</i>	46

4.	BALANCES	48
4.1	Balance de masa	48
4.2	Balance energético	51
5.	ANÁLISIS DE RESULTADOS	53
6.	ANÁLISIS DE IMPACTO AMBIENTAL	57
6.1	Emisiones de contaminantes mediante la combustión de etanol	57
7.	ANÁLISIS ECONÓMICO DEL PROYECTO	60
	CONCLUSIONES	63
	BIBLIOGRAFIA	64

LISTA DE FIGURAS

	pág.
Figura 1. Distribución porcentual de la producción de biocombustibles líquidos en el mundo (año 2019)	14
Figura 2. Variación interanual porcentual, tendencia y producción total (en miles de m3) de biocombustibles líquidos en el mundo	15
Figura 3. Estructura de biomasa lignocelulósica	17
Figura 4. Procesos de producción para la obtención de bioetanol	19
Figura 5. Producción y ventas de Alcohol carburante – etanol (2015-2020)	23
Figura 6. Potencial Energético departamento de Cundinamarca	25
Figura 7. Área sembrada, cosechada y producción de Maíz Amarillo	26
Figura 8. Histórico de área, producción y rendimiento del Maíz	27
Figura 9. Área sembrada de maíz departamento de Cundinamarca	28
Figura 10. Producción de maíz por provincias departamento de Cundinamarca	29
Figura 11. Comparativo propiedades del rastrojo de maíz con otras fuentes de energía	33
Figura 12. Proceso producción de Bioetanol	34
Figura 13. Diagrama flujo producción de etanol	38
Figura 14. Molino de bolas	43
Figura 15. Equipo explosión a vapor	44
Figura 16. Tanque de fermentación	45
Figura 17. Filtro prensa tipo Batch	46
Figura 18. Columnas de destilación binaria	47
Figura 19. Balance de masa por equipo	48
Figura 20. Balance de masa etapa de Pretratamiento	49
Figura 21. Balance de masa etapa de Fermentación	49
Figura 22. Balance de masa etapa de Separación	50
Figura 23. Concentración del Etanol	54
Figura 24 Beneficios ambientales uso bioetanol	59

LISTA DE TABLAS

	pág.
Tabla 1. Composición química	30
Tabla 2. Análisis próximo – Rastrojo de Maíz	31
Tabla 3. Análisis elemental – Rastrojo de Maíz	32
Tabla 4. Poder calorífico inferior – Rastrojo de Maíz.	32
Tabla 5. Variables y unidades de control	41
Tabla 6. Parámetros estimados del modelo	42
Tabla 7. Parámetros obtenidos por regresión de datos de sacarificación	42
Tabla 8. Productos Obtenidos por día	50
Tabla 9. Balance Energía	51
Tabla 10. Flujos involucrados en el proceso de obtención de bioetanol (Kg/día)	52
Tabla 11. Características de combustibles líquidos.	57
Tabla 12. Reducción emisiones dióxido de carbono	58
Tabla 13. Comparación costos combustibles	60
Tabla 14. Comparación costos mezclas de combustibles	60
Tabla 15. Costo de Capital	61
Tabla 16. Costo de Inversión	61
Tabla 17. Flujo de caja	62

RESUMEN

En este proyecto se realizó el diseño conceptual de una planta de producción de bioetanol en el departamento de Cundinamarca a base de residuos agroindustriales, para este caso el rastrojo de maíz.

A partir de la bibliografía se determinaron las características de la materia prima usada, tales como su caracterización fisicoquímica y el potencial energético. Para la producción de bioetanol se optó realizar el proceso mediante una reacción de sacarificación y fermentación realizadas en simultáneo para lograr extraer los azúcares aún presentes en el rastrojo de maíz. También se emplearon procesos de pretratamientos como la impregnación de ácido sulfúrico antes de la explosión a vapor para ayudar a esta liberación de azúcares.

A partir de las estimaciones del volumen utilizado en los balances de masa y energía del proceso, se determinaron los principales equipos o esquema tecnológico necesario en la planta de producción.

Se evaluaron los beneficios que la producción de este biocombustible puede traer para minimizar la huella de carbono y los costos asociados al consumo de combustible que son generados durante la cosecha del maíz, tomando como aplicación la mezcla del bioetanol-diésel.

INTRODUCCIÓN

La dependencia del uso de combustibles fósiles para diferentes aplicaciones es una de las principales causas del deterioro ambiental, debido a las emisiones gaseosas tóxicas que estos generan durante su combustión [1]. Además, los recursos fósiles son limitados, por tanto, existe un consenso entre académicos, autoridades, empresarios y consumidores que buscan un mayor crecimiento económico y mejorar la calidad de vida, con fuentes de energía confiables y de bajo impacto ambiental, social y económico [2].

Por lo tanto, se ha visto la necesidad de realizar una transición a fuentes de energía renovables no convencionales como lo son: la energía solar, eólica, mareomotriz, geotérmica y la obtenida a partir de la biomasa; estos son recursos que a nivel mundial son ambientalmente sostenibles [3]. De esta forma, se tiene bajo investigación el desarrollo basado en los biocombustibles a partir del cultivo de cereales y oleaginosas, de las propiedades del grano y de los elementos de la biomasa, que inciden sobre los rendimientos teóricos de bioetanol.

Una de las principales preocupaciones sobre el uso de biocombustibles es la posibilidad de hambruna en los países agrícolas, debido a que la exportación de las cosechas incrementará por la demanda para su consumo, ya sea a nivel alimenticio o para la aplicación energética [4]. Alonso-Gómez y Bello-Pérez [5] explican como la producción de etanol puede variar a partir de las biomásas de mayor uso, partiendo de la estructura vegetal y la forma en que la biomasa a utilizar almacena la energía.

Los tallos de la caña de azúcar la almacenan en forma de sacarosa, los granos de maíz almacenan la energía en forma de almidón y los residuos de cultivos como la paja del trigo o los tallos del maíz, almacenan la energía en forma de carbohidratos complejos como la celulosa y hemicelulosa. Así, las características de las materias primas determinan los pretratamientos y tratamientos necesarios para la obtención de los azúcares fermentables y su conversión a etanol por microorganismos.

De igual manera Alirio Delmar *et al.* [6] mencionan que las tecnologías de producción

de etanol hacen referencia a procesos de fermentación e hidrólisis de materias primas comestibles (caña de azúcar y maíz), las cuales a nivel mundial están bastante maduras. No obstante, en virtud de la enorme polémica global con relación al posible desabastecimiento de alimentos derivado de la producción masiva de biocombustibles, se están investigando otras fuentes, con mayor énfasis en biomasa residual de procesos industriales, los llamados biocombustibles de segunda generación.

Partiendo de los residuos de rastrojo de maíz generados en el departamento de Cundinamarca, se obtendrá bioetanol a partir de la fermentación de los azúcares encontrados en la biomasa residual. De esta forma, se originan sustancias menos contaminantes utilizadas principalmente por el parque automotor.

OBJETIVOS

Objetivo general

Realizar el diseño conceptual de una planta de producción de bioetanol a partir del rastrojo de maíz en el departamento de Cundinamarca

Objetivos específicos

- Determinar la caracterización fisicoquímica, de potencial energético y de valores de producción del rastrojo de maíz en el departamento de Cundinamarca de acuerdo con la bibliografía.
- Definir el esquema tecnológico de la planta de producción de bioetanol determinando las unidades de operación, condiciones de operacionales y cinéticas de reacción.
- Establecer el balance de masa y energía de la planta de producción de bioetanol de acuerdo con el esquema tecnológico definido para las diferentes condiciones operacionales analizadas.

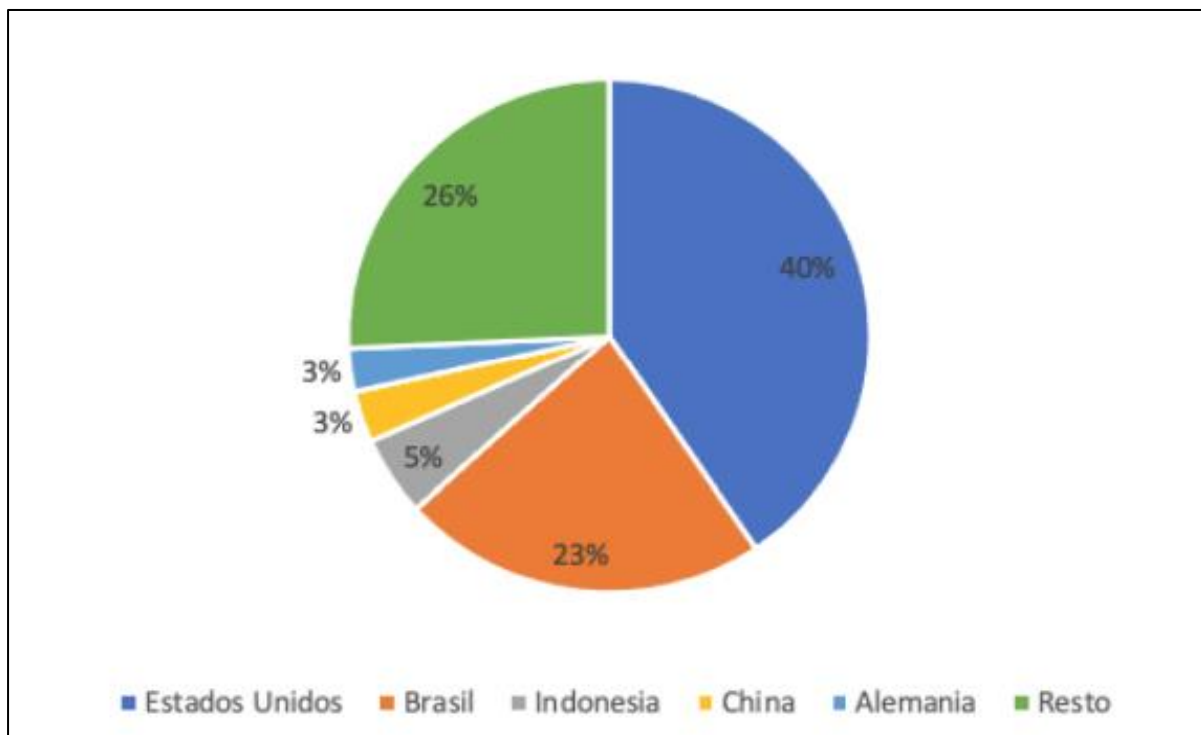
1. GENERALIDADES

La producción biocombustibles líquidos ha aumentado a lo largo de los años, esto es gracias a la investigación que avanza en cada uno de los países para aprovechar una movilidad más limpia sin grandes cambios técnicos. Como se muestra en la Figura 1 los cinco principales productores de biocombustibles líquidos son Estados Unidos (40 %), Brasil (23 %) Indonesia (5 %), China (3 %) y Alemania (3 %). El 26 % restante de la producción se distribuye en los restantes países del mundo, con una participación destacada de Francia, Argentina, Tailandia, India y España [7].

La producción mundial de biocombustibles líquidos mostró un crecimiento acumulado del 53 % en la última década (2010-2019). La tasa de variación interanual osciló en ese período entre el 1 % y el 13 %, con una clara tendencia alcista en la producción, que en 2019 llegó a 163 millones de metros cúbicos [7].

Figura 1.

Distribución porcentual de la producción de biocombustibles líquidos en el mundo (año 2019).

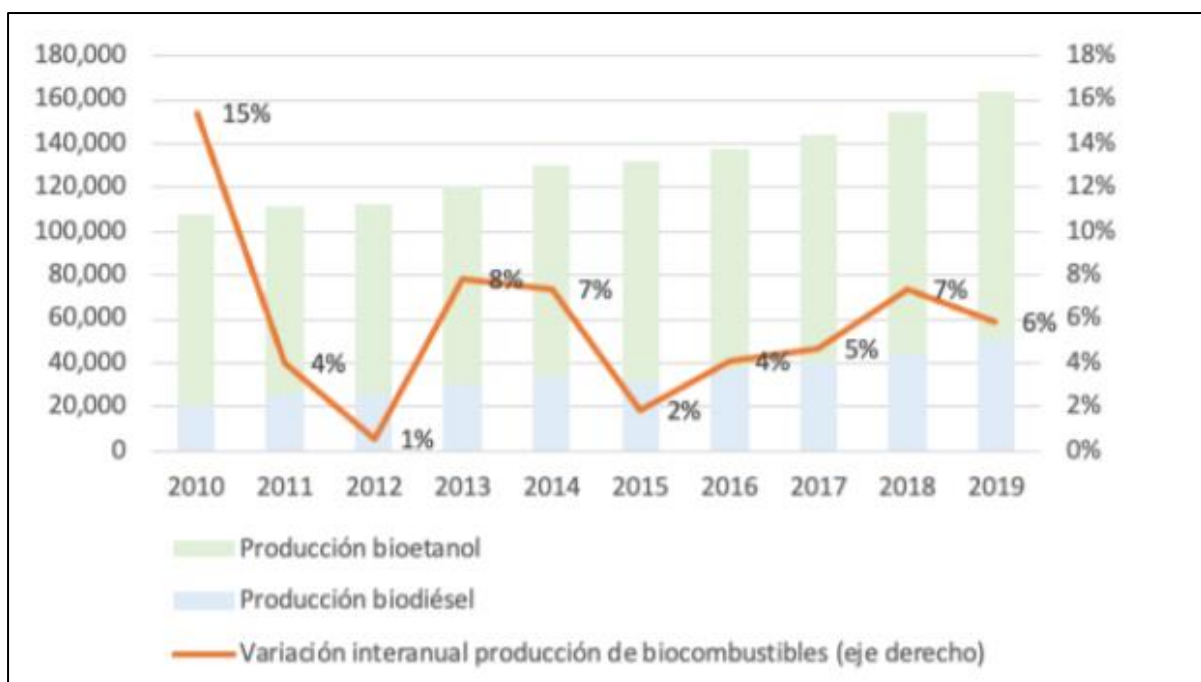


Nota. Producción de biocombustibles líquidos en el mundo (año 2019). Tomado de: M. A. Torroba, "Atlas de los biocombustibles líquidos 2019-2020," 2020.

En la Figura 2 muestra como la producción de bioetanol en el mundo tiene un crecimiento acumulado de 31 % en la última década (2010-2019). La tasa de variación interanual osciló entre el -1 % y 15 %, con una clara tendencia creciente de la producción, que llegó a 112 millones de metros cúbicos en 2019 [8] produciendo más del 8% en promedio que el biodiésel.

Figura 2.

Variación interanual porcentual, tendencia y producción total (en miles de m³) de biocombustibles líquidos en el mundo.



Nota. Tendencia y producción total de biocombustibles líquidos en el mundo. Tomado de: H. Escalante et al, Atlas Del Potencial Energético De La Biomasa Residual En Colombia. UPME, 2011.

1.1 Materia prima

Se define la biomasa como la fracción biodegradable de los productos, desechos y residuos de origen biológico procedentes de actividades agrarias (incluidas las sustancias de origen vegetal y de origen animal), de la silvicultura y de las industrias conexas, incluidas la pesca y la acuicultura, así como la fracción biológica degradable de los residuos industriales y municipales. Por tanto, los recursos biomásicos provendrán de fuentes muy diversas y heterogéneas [4].

1.1.1 Biomasa

Las plantas aprovechan la radiación solar para su metabolismo a través de la fotosíntesis, que es un proceso mediante el cual éstas transforman la energía solar en energía química. El proceso fotosintético se compone de una compleja red de reacciones fotoquímicas y bioquímicas que se producen en los cloroplastos de la célula [9].

La biomasa es la fuente más abundante de material lignocelulósico en el mundo y puede ser aprovechada para la producción de energía por tratarse de una fuente natural renovable[10]. Además, para la obtención de energía deben considerarse los siguientes tipos de biomasa:

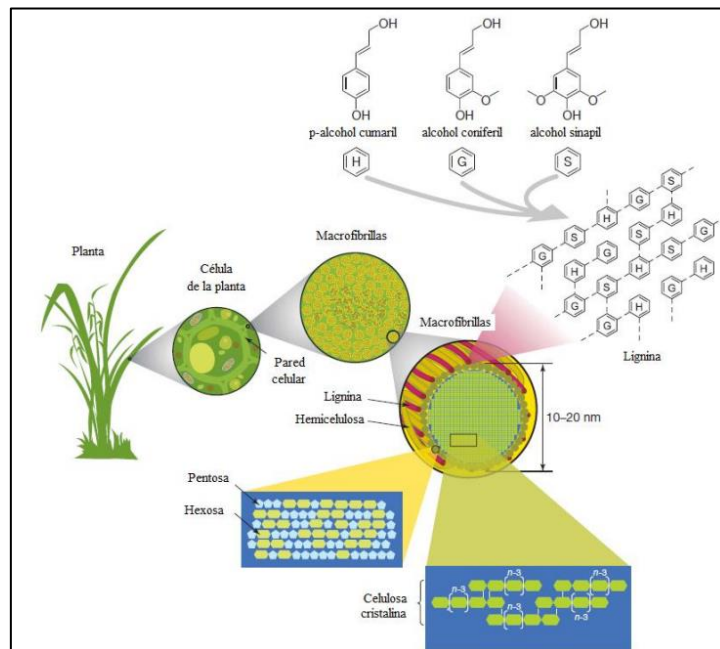
- **Biomasa natural:** es aquella extraída de una masa forestal, que se produce de forma espontánea en la naturaleza [11]. Sin embargo, este tipo de biomasa no es la más adecuada para el uso masivo de energía porque esto podría conducir a la destrucción de los ecosistemas que la producen, y que constituyen una reserva de valor incalculable[12].
- **Biomasa residual:** es la que se genera como consecuencia de cualquier proceso en que se consuma biomasa. Se produce en explotaciones agrícolas, forestales o ganaderas, así como los residuos de origen orgánico generados en las industrias y en los núcleos urbanos[12].

1.1.2 Componentes de la biomasa lignocelulósica

Para utilizar los residuos lignocelulósicos como fuente en la producción de bioetanol, es necesario conocer como lo señala Rubin, E. M.,[13] el porcentaje de los tres principales componentes químicos que define la estructura de la biomasa lignocelulósica: porcentaje de celulosa, hemicelulosa y lignina (ver figura 3). Los cuales, se encuentran almacenados en las hojas y tallos de los diferentes cultivos como el maíz, el sorgo y la caña de azúcar, entre otros.

Figura 3.

Estructura de biomasa lignocelulósica.



Nota. Estructura de la biomasa lignocelulósica. Tomado de: Rubin, E. M., 2008). "Genomics of cellulosic biofuels." Nature.

- **Celulosa:** la celulosa es el compuesto orgánico de mayor abundancia en la naturaleza, de gran importancia a nivel biológico y un polímero de interés industrial. Químicamente es un polímero de la D-glucosa que se unen entre sí por enlaces β -1,4; disposición que la hace estable, además de poseer enlaces de hidrógeno que unen sus moléculas entre sí, confiriéndole sus conocidas propiedades como material estructural de la pared celular [14].
- **Hemicelulosa:** las hemicelulosas son más difíciles de clasificar, es decir, son polisacáridos con grupos heterogéneos. Tienen un grado de polimerización entre 100 y 200 en fibras madereras. Son insolubles en agua, pero en medio alcalino se disuelven. Plantas herbáceas suelen contener más hemicelulosas y menos ramificados como las pajas de cereales (trigo, arroz, maíz, cebada, entre otros) [15].
- **Lignina:** la lignina es un polímero complejo que desempeña un papel de cementación para conectar la celulosa y la hemicelulosa, aumentando las propiedades de resistencia mecánica, además hace a la planta resistente contra enfermedades y biodegradación por microorganismos [16].

1.2 Procesos de producción de bioetanol

Los biocombustibles son básicamente alcoholes, éteres, ésteres y otros compuestos químicos producidos a partir de la biomasa. Por ejemplo, plantas herbáceas y leñosas, residuos de la agricultura y actividad forestal; y una gran cantidad de desechos industriales, como son los desperdicios de la industria alimenticia [17].

Según el tipo de materia prima utilizado para la producción de bioetanol se puede dividir en dos categorías: de primera o de segunda generación [18]. El de primera generación, es el etanol que se obtiene durante el proceso de fermentación de los azúcares de la materia prima con alto contenido de sacarosa, entre las más conocidas se encuentran la caña de azúcar y la remolacha. Al tener un alto contenido de sacarosa, permite que las levaduras utilizadas en el proceso de fermentación asimilen de manera fácil los azúcares reductores producidos por los microorganismos encargados de la fermentación [19].

El bioetanol de segunda generación es aquel se obtiene desde residuos forestales y agrícolas, es uno de los biocombustibles con mayor capacidad para sustituir a los combustibles convencionales convirtiéndose en una herramienta para combatir el cambio climático, a diferencia de la anterior generación este no involucra deforestación de bosques para la implementación de cultivos para su producción, esto a su vez puede traer consigo problemas de alimentación para la sociedad [20].

En la Figura 4, se presenta un esquema de producción de bioetanol. Se menciona la materia prima utilizada y como se encuentra almacenada su energía, al igual que los procesos mecánicos para su pretratamiento y posterior obtención de los azúcares necesarios para obtener el combustible, clasificados de acuerdo con el tipo de producción: primera o segunda generación.

Para las sacarosas como lo son la caña de azúcar y la melaza, se les hace un pretratamiento de triturado y filtrado para posteriormente realizar el procesamiento del azúcar con la fermentación, destilación y deshidratación para finalmente obtener el bioetanol como producto final. De la misma forma los cultivos energéticos de almidón

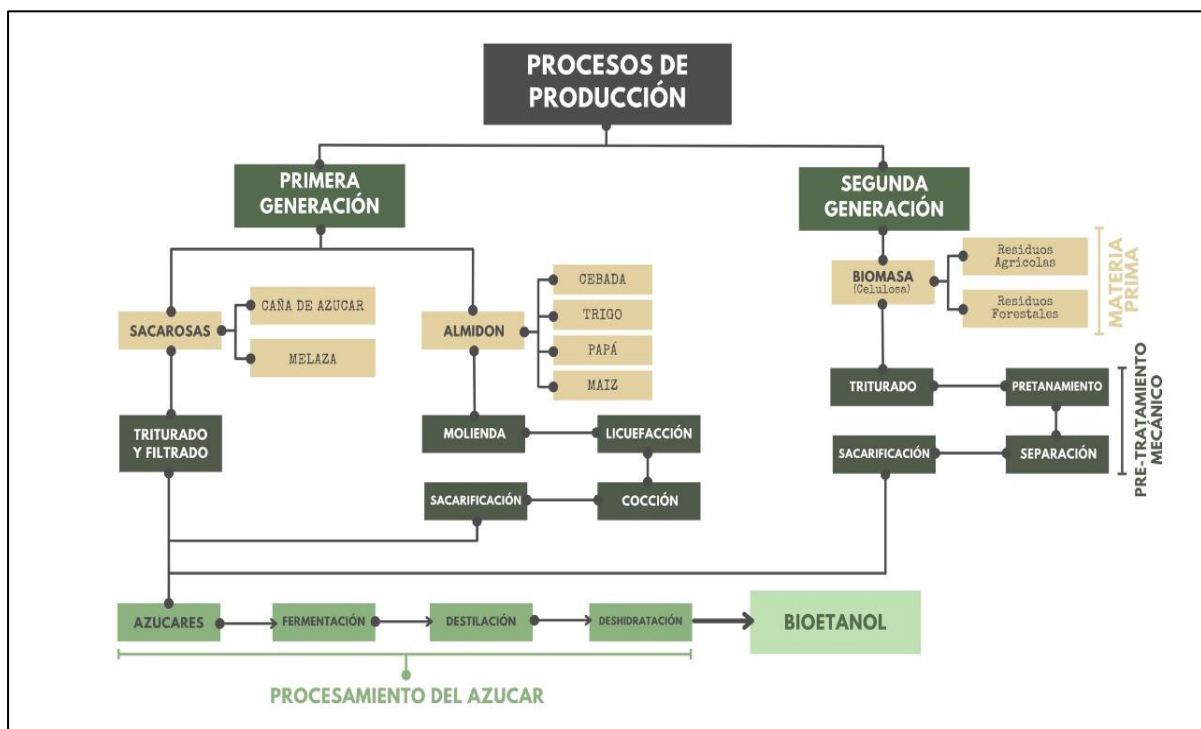
deben tener cuatro pretratamientos mecánicos que son, la molienda, licuefacción, cocción y sacarificación para luego pasar por el mismo procesamiento de azúcares mencionado anteriormente.

En el proceso de segunda generación la biomasa residual debe someterse a los pretratamientos de triturado, separación y sacarificación para continuar con procesamiento de azúcares.

En el trabajo realizado por Cardona et al. [21]. la selección y evaluación de las tecnologías para cada una de las etapas, conlleva la evaluación cualitativa de cada tecnología con base en criterios económicos y ambientales, dando calificaciones a cada criterio.

Figura 4.

Procesos de producción para la obtención de bioetanol.



Nota. Esquema resumen para la obtención de biocombustibles.

1.3 Bioetanol (propiedades, usos, ventajas, desventajas)

La Unidad de Planeación Minero Energética (UPME) en su atlas del potencial

energético de la biomasa residual en Colombia [8] menciona que al aprovechar de manera eficiente los diferentes residuos sólidos como fuente de energía renovable, se puede impactar de manera positiva al medio ambiente permitiendo reducir las emisiones de gases de efecto invernadero y minimizar la disposición de contaminantes en el suelo, agua y aire; a diferencia de los combustibles fósiles.

El etanol es un biocombustible de primera y segunda generación, alternativo a los combustibles fósiles, fabricado a partir de material vegetal. Su combustión emite a la atmósfera una cantidad de CO₂ que será absorbida por otra planta en el proceso de fotosíntesis [22]. Las tecnologías de producción de etanol hacen referencia a procesos de fermentación e hidrólisis de materias primas comestibles (caña de azúcar y maíz), las cuales a nivel mundial están bastante maduras [6].

Entre las biomásas que pueden ser utilizadas para la producción de bioetanol, se encuentra la cascarilla de arroz. De acuerdo con Samir Merano [23], la cascarilla de arroz permite la producción de biocombustibles de manera rentable, puesto que se puede producir 0.149 kg de etanol por cada kg de biomasa residual, lo cual representa la generación de productos de valor agregado a partir de desechos sólidos con bajo valor de mercado.

Así pues, en el Centro de Investigación y Desarrollo del Transporte de Cuba [24] en la actualidad han logrado algunos avances para la introducción del etanol como combustible en el transporte automotor, teniendo en consideración las características relacionadas con la producción azucarera que es una de las fuentes fundamentales para la obtención de etanol. Esta investigación se basó en el empleo de etanol hidratado para mezclar con gasolina y diésel, de tal forma que se mezcló un 25% de etanol tanto en gasolina como en diésel. Para este último caso se hace necesario hacer uso de un kit para la alimentación independiente de etanol y diésel lo cual significa una complicación en el sistema de alimentación.

A manera de resumen, se puede decir que el uso del bioetanol como combustible presenta las siguientes ventajas: [25]

- Un aumento en la seguridad de energía. Al ser un recurso renovable promueve la reducción y el uso de los hidrocarburos, también mantiene una estabilidad económica frente a la irregularidad de precios y reservas de los hidrocarburos.
- Oportunidades económicas para los agricultores. Los biocombustibles de segunda generación permiten al agricultor aprovechar de mejor manera sus cultivos, sin ver afectada la cosecha principal. Fuente de empleo rural y de desarrollo para la zona.
- Reducciones moderadas en las emisiones netas de gases de efecto invernadero. El dióxido de carbono generado durante la cosecha y producción del etanol se contrarrestan con la disminución de las emisiones generadas por los automotores que utilicen esta fuente de combustible, incluyendo también las cantidades de CO₂ absorbidas por el cultivo durante su periodo de cultivo.

Por otra parte, algunos de los inconvenientes o desventajas que presenta el uso del bioetanol, son los siguientes: [26]

- Su producción y valor están sujetos al mercado agrícola de la zona. Dependiendo del potencial agrícola de la zona y los diferentes cultivos que se manejen se establece la materia prima para la producción de etanol.
- Al aumentar el tamaño de los cultivos para una mayor producción, promueve la deforestación de las tierras, el no rotar de cultivos al igual que el uso de abonos y químicos necesarios para mantenerlos pueden generar erosión y cambios de acidez en el terreno. Se requiere una gran cantidad de tierra para el cultivo de la materia prima. Esto podría provocar la destrucción de hábitats naturales, aumentando la deforestación por ejemplo las selvas tropicales.
- Existe la preocupación de que, debido a los precios lucrativos del bioetanol, algunos agricultores puedan sacrificar cultivos alimentarios por la producción de biocombustibles, lo que aumentará los precios de los alimentos en todo el mundo.
- El contenido energético de la gasolina es muy superior al del bioetanol. Quemar

un litro de etanol proporciona un 34 % menos de energía que quemar la misma cantidad de gasolina. En otras palabras, el bioetanol no es tan eficiente como el petróleo. Su contenido energético es un 70 % a comparación del de la gasolina.

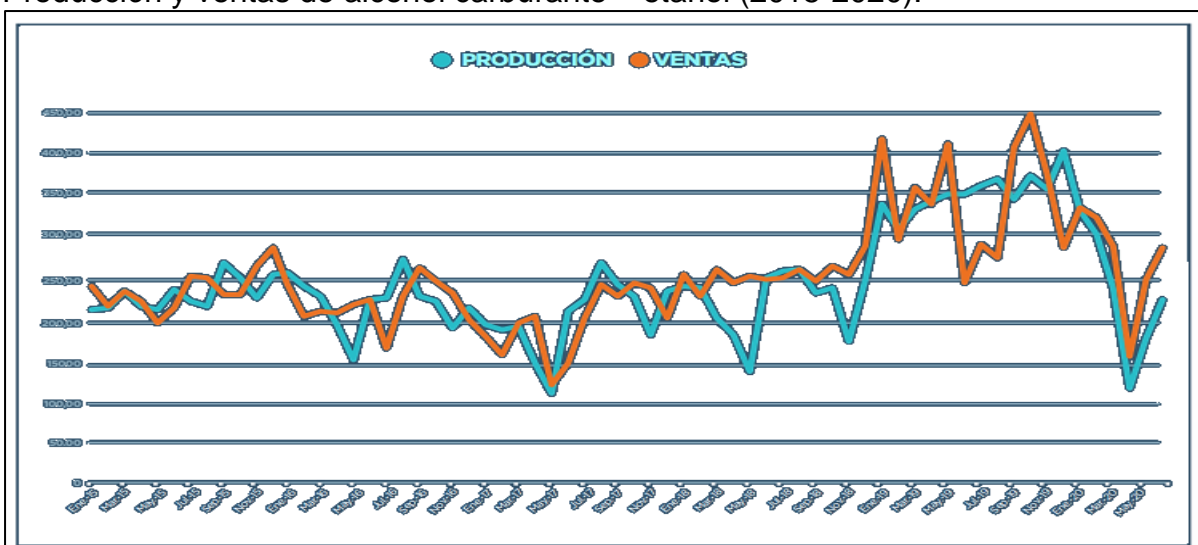
- El etanol es higroscópico, significa que absorbe agua del aire y, por lo tanto, tiene una alta agresividad a la corrosión. Es por eso que se transporta solo por transporte automático o ferrocarril.

2. CARACTERIZACIÓN DE LA MATERIA PRIMA Y PRODUCCIÓN DEL RASTROJO DE MAIZ

Gracias al potencial agropecuario que tiene Colombia, entidades como el Ministerio del Medio Ambiente, La Corporación Para El Desarrollo Industrial de la Biotecnología y Producción Limpia (CORPODIB) y la UPME han desarrollado e impulsado los estudios para la producción y uso de biocombustibles, las políticas de regulación y venta, así como los beneficios y estímulos de su aplicación. Alonso Diana [27] afirma que. “Colombia tiene óptimas condiciones agrícolas para la generación de cultivos no sólo alimentarios, también se generan materias primas de origen vegetal que permiten el equilibrio alimentario al producir bioetanol de segunda, tercera y cuarta generación.”

Con la ley 693 de 2001 también conocida como ley del etanol carburante, Colombia inició el proceso para que en el 2008 se lograra producir etanol carburante a partir de la caña de azúcar [28]. De acuerdo con el Boletín estadístico minero energético de la UPME, la producción y venta del alcohol carburante–etanol ha tenido un incremento en los últimos años [29], a excepción del año 2020, ya que debido a la pandemia ocasionada por el virus COVID 19, se ve una caída considerable en producción y ventas, tal como se logra evidenciar en la Figura 5.

Figura 5.
Producción y ventas de alcohol carburante – etanol (2015-2020).



Nota. Comportamiento escala de tiempo de la producción y ventas de Alcohol carburante – etanol (2015-2020). Tomado de: UPME, "Boletín Estadístico de Minas y Energía 2016 - 2020," (29), 2021.

Cabe destacar que la producción de biocombustibles a partir de cultivos locales puede terminar con la dependencia y el gasto en combustibles importados, mejorar la autosuficiencia de las sociedades y generar empleos. Por lo tanto, se evidencia que el rastrojo de maíz ciertamente funciona como materia prima para la producción de bioetanol de segunda generación, promoviendo de esta manera el uso de las biomásas residuales como fuentes no convencionales de energía de acuerdo con lo estipulado en la ley 1715 de 2014.

2.1 Sector y ubicación

Bien es sabido que un cultivo importante a nivel mundial es el maíz y se estima que alrededor del 80 % del maíz en el mundo son desechos, por lo que este material vegetal podría ser plenamente utilizado como materia prima en la producción de bioetanol [30].

En Colombia, el maíz es el tercer cultivo con mayor superficie de siembra después del café y el arroz. A pesar de su relevancia, Colombia presenta bajos índices de productividad promedio de maíz en comparación con los principales países productores. En 2016, el rendimiento promedio para maíz en Colombia se situó en 3.6 t/ha, mientras que en Estados Unidos fue de 11 t/ha, siendo el promedio mundial de 5.4 t/ha [31].

Los principales departamentos productores de maíz del país son: Meta, Tolima Córdoba y Valle del Cauca. De tal manera, pese a que el departamento de Cundinamarca no es el principal productor de cultivo de maíz en el país, se estudia la posibilidad de que, con la producción de un departamento de mediano rendimiento, se pueda generar la biomasa residual, en este caso el rastrojo del maíz, de tal modo que se logre el bioetanol suficiente para que sea rentable el proyecto.

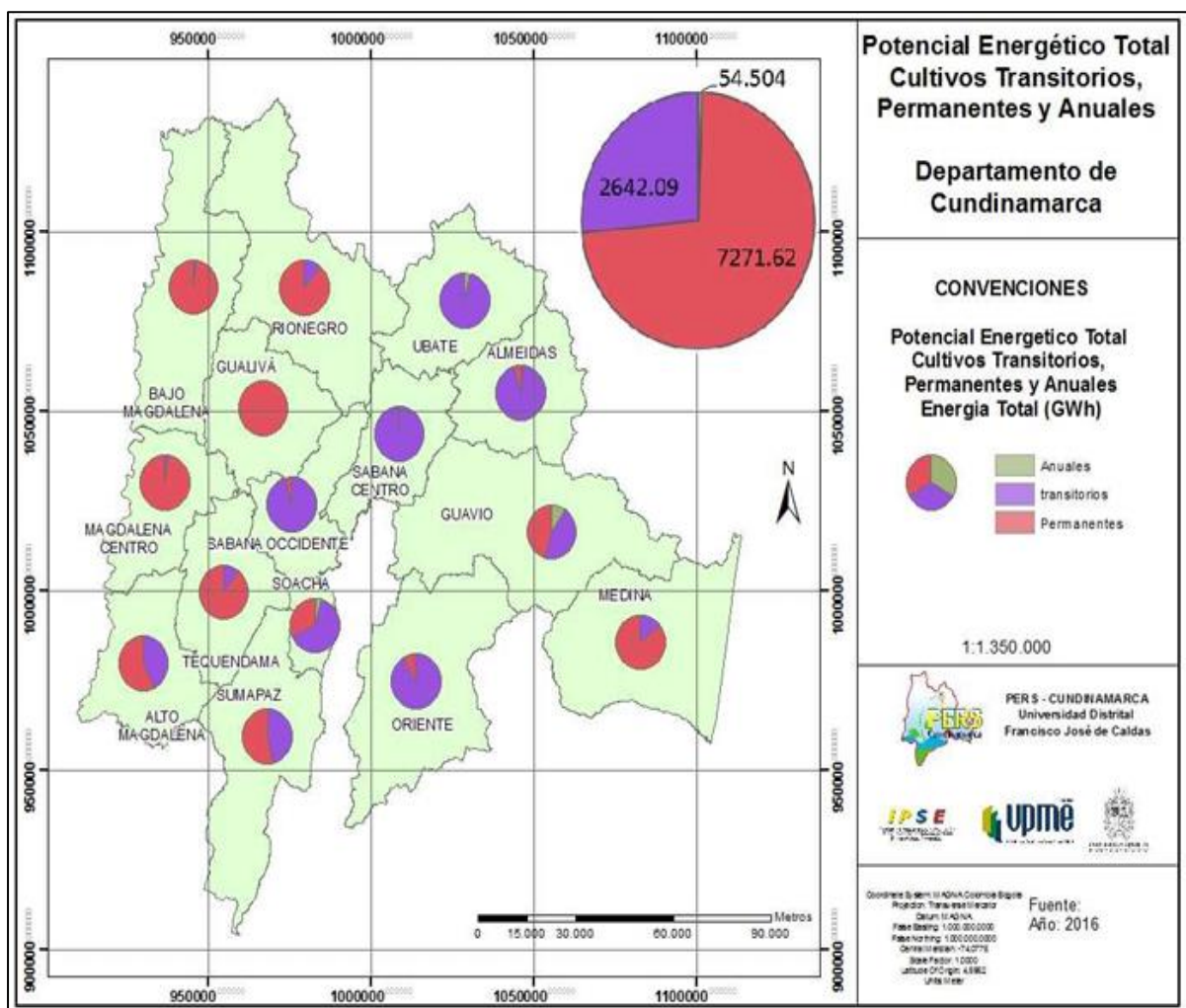
Para determinar en qué región del departamento se puede ubicar la planta de producción, y de acuerdo con el trabajo desarrollado por Carlos Quintero y Luis Quiroga [32], donde clasificaron los diferentes tipos de cultivos y su potencial energético, se decide que la mejor zona para desarrollar este proyecto es la Sabana

de Occidente, región donde los cultivos transitorios en los cuales se incluye el maíz, representan una gran participación, como se muestra en la figura 6.

Se consideran cultivos transitorios aquellos que tienen un ciclo vegetativo corto, entre 4 y 7 meses. La región o provincia de la sabana de Occidente tiene como jurisdicción a los municipios de Bojacá, El Rosal, Funza, Madrid, Mosquera, Subachoque, Zipacón y Facatativá [33].

Figura 6.

Potencial Energético departamento de Cundinamarca.



Nota. Potencial Energético Total del departamento de Cundinamarca teniendo en cuenta el tipo de cultivo: transitorios, permanentes y anuales. Tomado de: Potencial Estimación del potencial energético a partir de la biomasa primaria agrícola en el departamento de Cundinamarca. C. A. Quintero et al, "ESTIMACIÓN DEL POTENCIAL ENERGÉTICO A PARTIR DE LA BIOMASA PRIMARIA AGRÍCOLA EN EL DEPARTAMENTO DE CUNDINAMARCA," 2017.

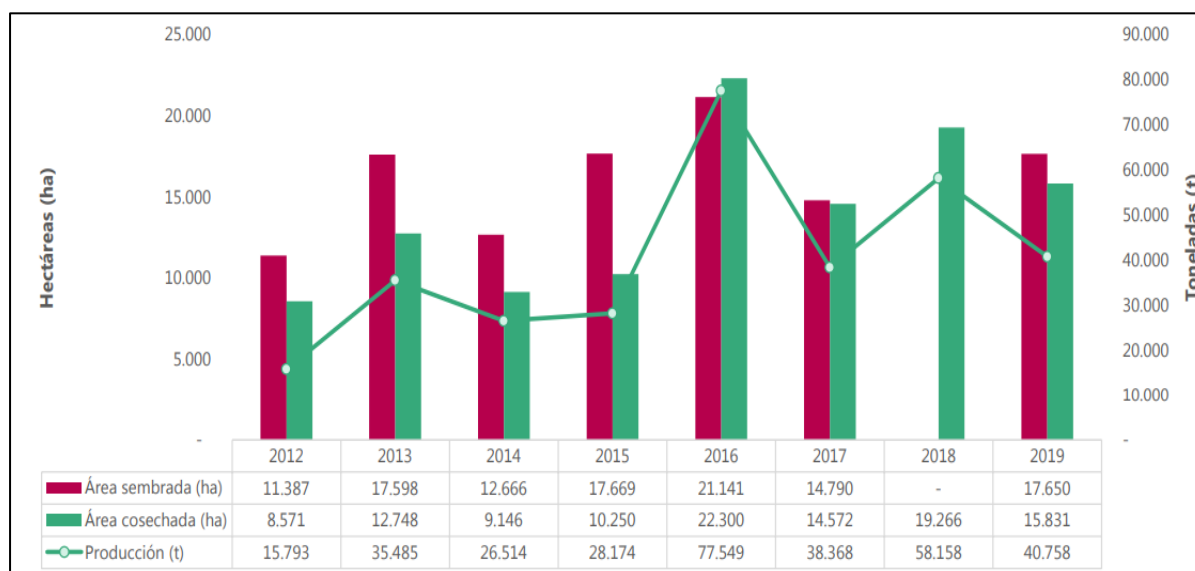
2.2 Producción

Partiendo de las fuentes consultadas, con los datos estadísticos necesarios se obtiene la cantidad de área sembrada en hectáreas del cultivo de maíz. Luego se determinará un estimativo de los residuos generados por dichos cultivos, obteniendo un valor inicial de la masa para la producción de bioetanol de segunda generación.

Según la Encuesta Nacional Agropecuaria ENA para el año 2019 [34] la producción de maíz amarillo en el departamento de Cundinamarca se estimó en un área cosechada de 15.831 hectáreas, teniendo una participación del 6.7 % a nivel nacional, quedando atrás de los departamentos del Meta, Córdoba, Magdalena, Tolima y el Huila. (Ver Figura 7).

Figura 7.

Área sembrada, cosechada y producción de Maíz Amarillo.



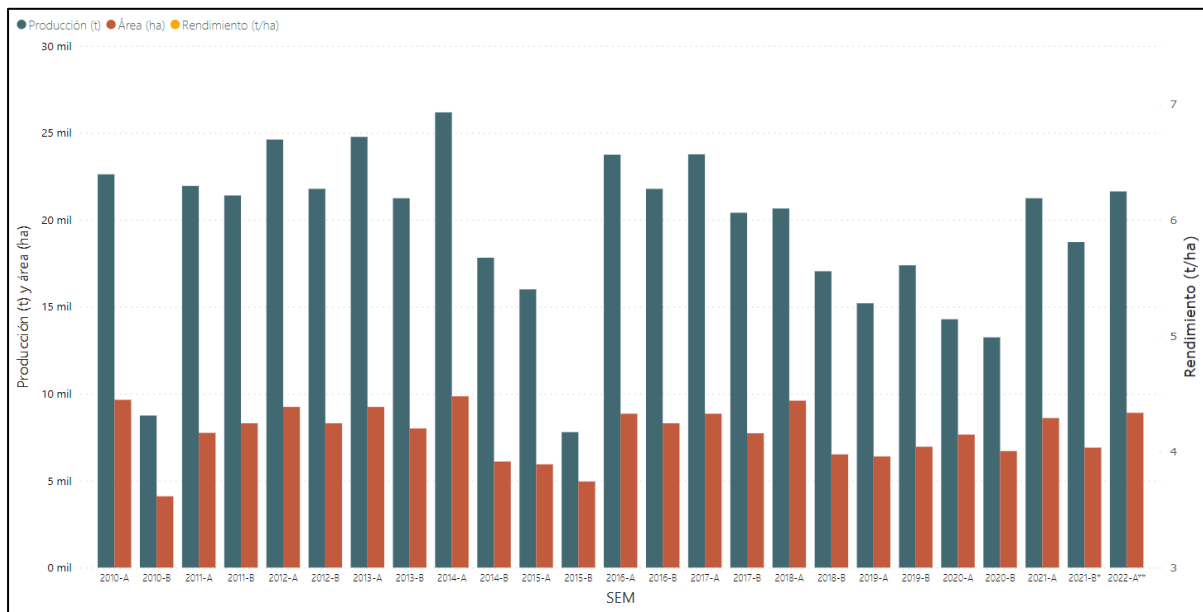
Nota. Maíz amarillo - Área sembrada, área cosechada y producción 2012-2019 Cundinamarca. Tomado de: Andres Cardenas Mondragon, "CCI inició nueva encuesta nacional agropecuaria (ENA)," Portafolio, 2009. Available: <https://search.proquest.com/docview/334439211>.

En las estadísticas presentadas por la Federación Nacional de Cultivadores de Cereales, Leguminosas y Soya (FENALCE), para el año 2021, el área sembrada de maíz amarillo tecnificado y tradicional para el departamento de Cundinamarca fue de 15.500 hectáreas, como se puede ver en la Figura 8.

En la evaluación agropecuaria del departamento de Cundinamarca, en la sección de estadísticas de cultivos para el año 2020, el área sembrada de maíz tradicional y tecnificado fue de 19.840 hectáreas [35]. A partir de este documento se obtiene la figura 9, donde se muestra la participación del área sembrada de las diferentes provincias para el primer y segundo semestre del año 2020.

Figura 8.

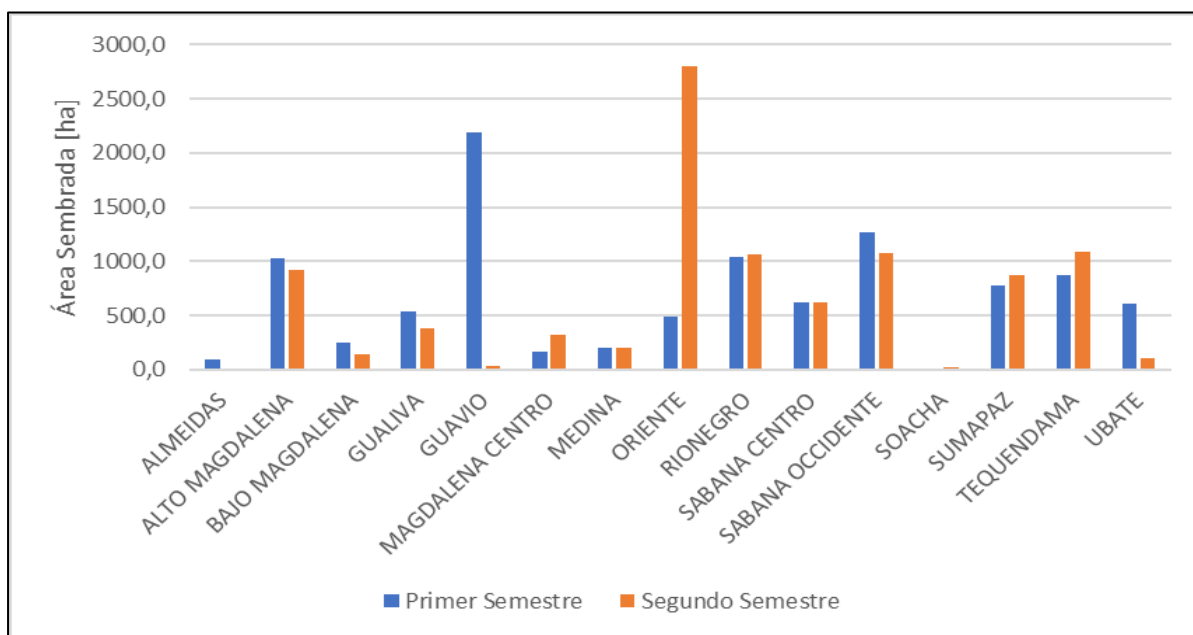
Histórico de área, producción y rendimiento del Maíz.



Nota. Histórico de área, producción y rendimiento del Maíz Tomado de: Federación Nacional de Cultivadores de Cereales, Leguminosas y Soya (FENALCE). [En línea]. Disponible: <https://app.powerbi.com/view?r=eyJrIjoiOTk3NDZhYTMtZjg5NC00OWIxLWE3NmItOTIzYjdlZmFmNmJhliwidCI6IjU2MmQ1YjJILTBMzEtNDdmOC1iZTk4LTNmMjI4Nzc4MDBhOCJ9> [Acceso: ene.15, 2022]

Figura 9.

Área sembrada de maíz departamento de Cundinamarca.



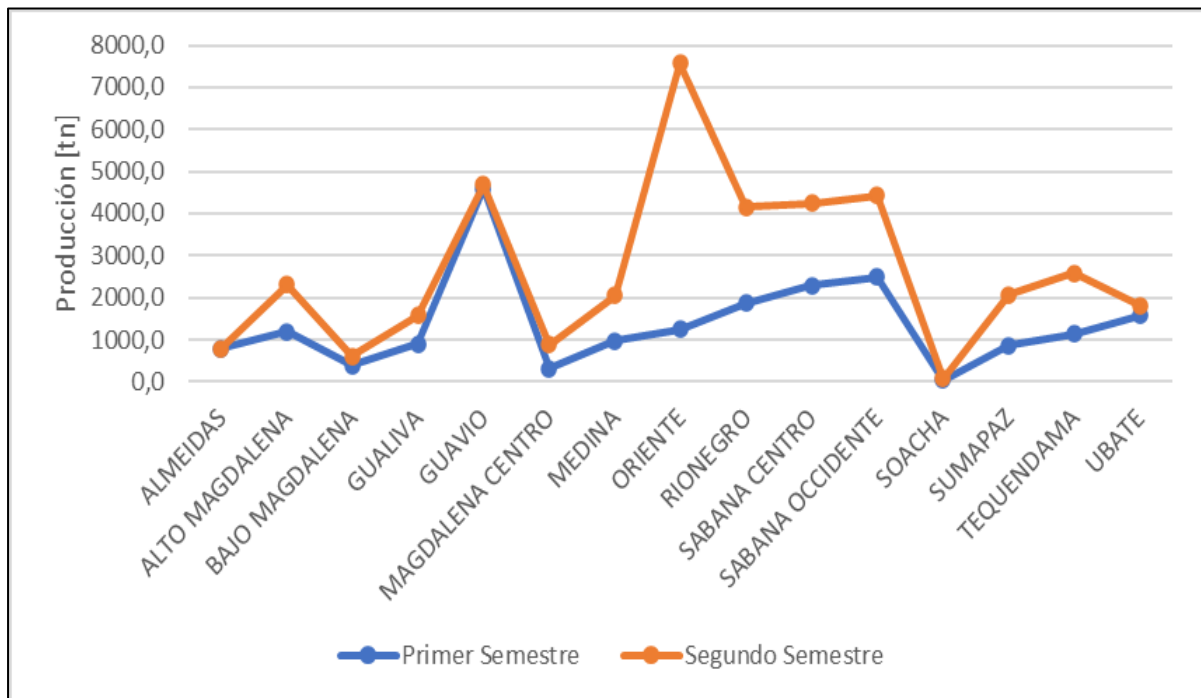
Nota. Área sembrada de maíz por provincias departamento de Cundinamarca.

El cultivo de maíz genera una gran cantidad de biomasa aérea (vegetación), de la cual el 50 % es cosechada en forma de grano, correspondiendo el resto a diversas estructuras de la planta, tales como, caña, hojas, panoja entre otras. Estos residuos pueden ser procesados para obtener fibra altamente digerible para alimentación animal, carbohidratos para la producción de etanol o alimentos y proteínas para consumo humano [36]. Es decir, de las 38.819 toneladas producidas de maíz en el 2020 en el departamento de Cundinamarca, 19.910 toneladas son biomasa residual. En la Figura 10, se evidencia la producción de las diferentes provincias del departamento para el primer y segundo semestre del 2020, para la cual también fue usada la data estadística obtenida de la evaluación agropecuaria del departamento de Cundinamarca.

Para el presente proyecto, se toma un estimativo de producción aproximado de 78 ton/día de biomasa residual del maíz, de acuerdo con los valores estadísticos del departamento de Cundinamarca.

Figura 10.

Producción de maíz por provincias departamento de Cundinamarca.



Nota. Producción de maíz por provincias departamento Cundinamarca.

Al comparar las Figuras 8, 9 y 10 se evidencia que la provincia sabana de occidente presenta una estabilidad tanto en su producción como en el área sembrada para los cultivos de maíz. Esta estabilidad permite asegurar un flujo másico de rastrojo de maíz necesario para la producción continua de bioetanol.

2.3 Análisis próximo, elemental

El rastrojo de maíz es un combustible sólido, por lo tanto, es necesario realizarle la caracterización detallada para determinar sus propiedades y la calidad de la biomasa como combustible. Los principales análisis para realizar esta caracterización son: análisis elemental, análisis próximo, poder calorífico, entre otros [37]. La caracterización se basa en el conocimiento de las características químicas, físicas, geométricas y minerales del combustible [38].

Mediante la información obtenida de varios autores, se establecieron los valores para el análisis próximo, elemental, composición química y poder calorífico Inferior.

2.3.1 Composición química

Los tres componentes poliméricos principales de una biomasa residual vegetal son celulosa, hemicelulosa y lignina. La celulosa y la hemicelulosa se pueden convertir en etanol y la lignina puede ser quemada en calderas para la generación de vapor y electricidad [39]. En la Tabla 1, se muestran los contenidos de estos componentes para el rastrojo de maíz, comparando los resultados de varios autores.

Tabla 1.

Composición química del rastrojo de maíz.

	Acevedo, A et al [39]	Alejandro, D [40]	Promedio
% Lignina	5,3	15,91	10,60
% Celulosa	33,4	41,36	37,38
% Hemicelulosa	34,5	15,93	25,21

Nota. Comparación de varios autores para la composición química del rastrojo de maíz.

La concentración de estos componentes que se encuentran normalmente en la naturaleza varía en los siguientes rangos: componente celulosa entre el 25 % y 50 %, componente hemicelulosa entre el 20 % y el 40 % y el componente lignina entre el 10 % y el 35 %. Al promediar los valores de los autores, se evidencia que los porcentajes obtenidos se encuentran entre estos rangos.

2.3.2 Análisis próximo

Determina el porcentaje en peso de material volátil, humedad, carbono fijo y cenizas, establece la cantidad de material que se consume durante el proceso de combustión. El material volátil es el primero en consumirse y genera gases; el carbono fijo es combustible sólido, el cual se oxida en una reacción heterogénea sólido-gas; y las cenizas, son la parte inorgánica de un combustible que permanece después de la combustión completa del mismo [37]. En la siguiente tabla se compara las fracciones porcentuales investigada, y se promedia.

Tabla 2.

Análisis próximo – Rastrojo de Maíz.

	P. Curto et al [37]	Cervantes, X [41]	Gómez, R et al [42]	Promedio
% Material Volátil	78,7	74,49	76,36	76,52
% Carbono Fijo	16,05	-	18,30	17,17
% Ceniza	4,7	6,08	5,35	5,38
% Humedad	-	9.58	-	9.58

Nota. Comparación de varios autores para el análisis próximo del rastrojo de maíz.

Los autores Ximena Cervantes [41], Rafael Gómez et al. [42] y Pedro Curto et al.[37] presentan valores cercanos en cada una de sus investigaciones. El rastrojo de maíz al tener estas fracciones porcentuales demuestra su potencial como biomasa residual, puesto que gran cantidad de su masa se consume y se transformará en energía debido al bajo porcentaje de cenizas que queda luego de su combustión.

2.3.3 Análisis elemental

El análisis químico elemental permite determinar el contenido total de carbono hidrógeno, oxígeno, nitrógeno y azufre (C, H, O, N y S) presente en muestras de naturaleza orgánica e inorgánica, ya sean sólidas o líquidas. A partir de los productos obtenidos después de realizarse la oxidación total de estos elementos, se puede establecer su composición química. El proceso se basa en la volatilización de una muestra por combustión total en atmósfera de oxígeno puro, para posteriormente medir los elementos ya mencionados que se encuentran en forma de Dióxido de Carbono (CO₂), agua (H₂O), óxidos de nitrógeno (NO_x) y óxido de azufre (SO_x).

En la Tabla 3, podemos ver las fracciones porcentuales de estos elementos para nuestro caso de estudio, el rastrojo de maíz.

Tabla 3.

Análisis elemental – Rastrojo de Maíz.

	P. Curto et al [37]	Cervantes, X [41]	Gómez, R et al [42]	Promedio
% C	50,1	43,2	41,89	45,1
% H	5,2	7,1	5,58	6,0
% O	43,8	48,8	39,99	44,2
% N	0,9	0,6	0,8	0,8
% S	0	0,3	0,1	0,1

Nota. Comparación de varios autores para el análisis elemental del rastrojo de maíz.

2.3.4 Poder calorífico

Establece la cantidad de energía, en forma de calor, que es posible obtener teóricamente de un combustible cuando este se quema por completo. Sus valores son dados por unidad de masa o de volumen luego de su combustión. Para nuestro caso, el dato a conocer corresponde al poder calorífico inferior, puesto que se asume que la presencia de agua en la muestra a evaluar no cambia de fase y se desprende en forma de vapor durante su combustión.

En la Tabla 4, comparamos los valores obtenidos en base seca por diferentes autores para el poder calorífico inferior y así obtener un valor promedio en kJ/kg.

Tabla 4.

Poder calorífico inferior – Rastrojo de Maíz.

Base Seca	P. Curto et al [37]	H. Escalante et al [8]	Cervantes, X [41]	Promedio
PCI [kJ/kg]	17154,00	14356,54	14400,00	15303,51

Nota. Comparación de varios autores para el poder calorífico inferior del rastrojo de maíz.

En el trabajo realizado por Lijun Wang et al., [43] como se muestra en la Figura 11 se comparan las propiedades físicas y químicas del rastrojo de maíz, granos húmedos de destilería y estiércol húmedo de ganado; tomando como valores de referencia al carbón una de las principales fuentes de energía. En este trabajo los valores son

brindados para ambos casos: material en base seca y material en base húmeda.

Figura 11.

Comparativo propiedades del rastrojo de maíz con otras fuentes de energía.

Property		Corn stover	Wet distillers grains	Fresh cattle manure	Coal*
Particle size (μm)		443	800	–	–
Bulk density after drying (kg/m^3)		180	525	780	1250
Moisture (%)	Wet basis	9.4	68.3	70.7	2.6
	Dry basis	10.4	215.6	241.7	2.7
Ash (%)	Wet basis	7.3	1.9	10.9	1.5
	Dry basis	8.1	5.8	37.2	1.5
Heating value (MJ/kg)	Wet basis	17.1	7.1	3.9	29.7
	Dry basis	18.9	22.5	13.3	30.5
	Dry and ash-free basis	20.4	23.8	21.2	31.0
Volatile	Wet basis	64.5	24.6	15.2	41.8
	Dry basis	71.6	78.0	52.0	42.9
	Dry and ash-free basis	77.4	82.6	82.8	43.6
Elemental analysis (% , dry and ash-free basis)	C	51.89	49.93	49.38	75.3
	H	5.45	7.26	6.46	5.4
	O	41.48	36.45	39.79	15.6
	N	0.84	5.31	3.33	1.8
	S	0.34	1.04	1.05	0.4
Chemical formula		$\text{CH}_{1.251}\text{O}_{0.600}$	$\text{CH}_{1.733}\text{O}_{0.548}$	$\text{CH}_{1.559}\text{O}_{0.605}$	$\text{CH}_{0.861}\text{O}_{0.155}$
		$\text{N}_{0.014}\text{S}_{0.002}$	$\text{N}_{0.091}\text{S}_{0.008}$	$\text{N}_{0.058}\text{S}_{0.008}$	$\text{N}_{0.021}\text{S}_{0.002}$

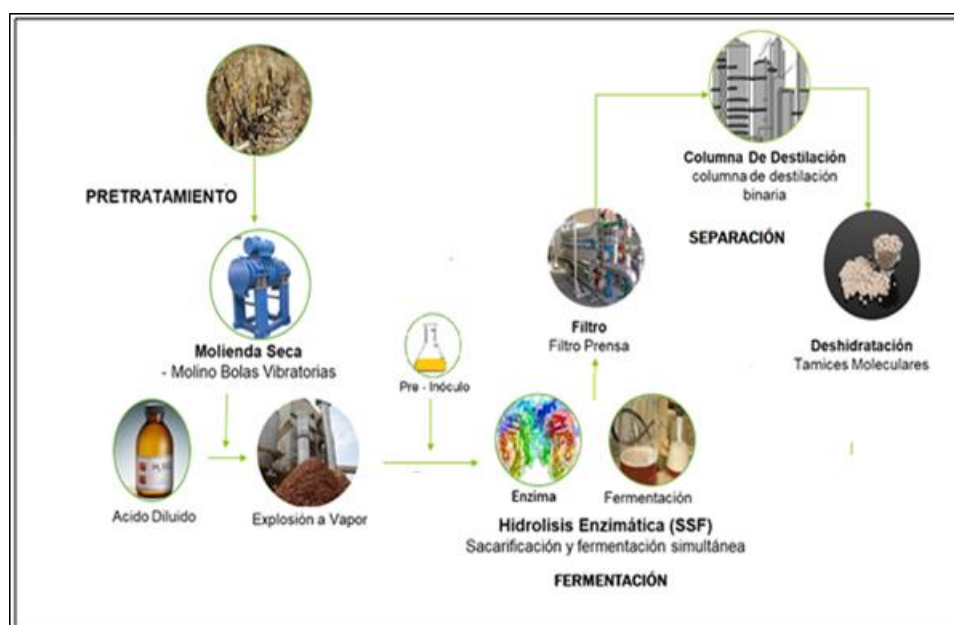
Nota. Propiedades físicas y químicas del rastrojo de maíz, granos húmedos de destilería y estiércol húmedo de ganado. Tomado de: Wang,L., A. Shahbazi and M. A. Hanna, 2011). "Characterization of corn stover, distiller grains and cattle manure for thermochemical conversion." Biomass Bioenergy.

3. INGENIERÍA CONCEPTUAL DE LA PLANTA

En la Figura 12, podemos ver un esquema del proceso que se llevará a cabo de manera teórica para la producción de bioetanol a partir de rastrojo de maíz. Para realizar la conversión de esta biomasa a bioetanol, el proceso fue clasificado en tres etapas: pretratamiento, fermentación y separación.

Figura 12.

Proceso producción de Bioetanol.



Nota. Esquema teórico para la producción de Bioetanol a partir del rastrojo de maíz.

3.1 Descripción del proceso

Partiendo del rastrojo de maíz como biomasa residual, y con el fin de convertir esta materia prima en bioetanol, es necesaria someterla a varios procesos y reacciones bioquímicas, empezando por el pretratamiento.

3.1.1 Pretratamiento

Los residuos lignocelulósicos, después de colectados, deben ser procesados adecuadamente, mediante la reducción del tamaño (3 a 6 mm) [44] en el proceso de molienda en molinos de bolas vibratorias el cual reduce a polvo la materia prima mediante la rotación y vibración de un tambor que contiene bolas de acero. En

seguida se realiza un lavado, si fuera necesario. De esta forma, los materiales están en condiciones óptimas para su procesamiento[45]. A continuación, se mencionan las etapas que hacen parte del pretratamiento.

3.1.1.a Molienda y lavado. La biomasa lignocelulósica es una materia que por su estructura es difícil de hidrolizar debido a la composición cristalina amorfa que tiene las microfibras de la celulosa por consiguiente están recubiertas por una capa de hemicelulosa y lignina que actúa como barrera resistente frente a reactivos químicos, por eso es muy importante la implementación de un pretratamiento para que este tipo de biomasa sea fraccionada [46] para su posterior fermentación.

Este tipo de pretratamiento se emplea a menudo para aumentar los rendimientos de hidrólisis enzimática[47]. El tamaño de partícula fina de la biomasa es fácil de utilizar para el proceso de digestión. Este tipo de pretratamiento es respetuoso con el medio ambiente ya que no hay exposición a productos químicos tóxicos[48].

3.1.1.b Ácido diluido. Los ácidos diluidos se emplean de forma satisfactoria para el pretratamiento, ya que el ácido sulfúrico (H_2SO_4) diluido permite lograr altas velocidades de reacción y mejora de manera significativa la hidrólisis de la celulosa. Al incrementar la hidrólisis de las hemicelulosas, que constituyen la tercera parte de la fracción de carbohidratos del material, se mejora también la economía del proceso[49].

3.1.1.c Explosión a vapor. La explosión a vapor es el método más empleado para el tratamiento de materiales lignocelulósicos [50]. En este método, la biomasa preparada adecuadamente se somete a vapor a presiones entre 0,7 y 4,8 MPa y temperaturas de unos 160–240 °C[51] posteriormente se realiza una descompresión rápida, lo que provoca la explosión del tejido celular y la separación de sus componentes en determinada extensión [44]. Cabe mencionar que un porcentaje significativo del material es transformado en inhibidores lo cual es una desventaja [52].

3.1.2 Fermentación

En esta etapa los microorganismos actúan de forma anaeróbica sobre los azúcares fermentables de la biomasa. A continuación, se describen los procesos que se llevan a cabo en esta segunda etapa.

3.1.2.a Sacarificación y fermentación simultáneas (SSF). Es el proceso mejorado de la hidrólisis enzimática de la biomasa [54]. La fermentación se realiza en varias etapas: primero, la glucosa se fermenta a etanol por intermedios de levaduras; esta mezcla es destilada para remover el etanol y quedando la xilosa sin convertir. Luego se añade una segunda levadura para fermentar la xilosa a etanol; este etanol producido es destilado, luego la lignina y el material celular restante se secan así que pueden llegar a quemarse para recuperar energía para el sistema, o para producir energía [55]. El SSF alimentado por lotes para ST se inicia con un 40 % de biomasa acondicionada con humedad (equivalente a 10 g de peso seco) que se someten a un pretratamiento con explosión a vapor durante 45 min [53]. Posteriormente se hace un ajuste del pH a 5,0 y la reconstitución a un volumen de suspensión con agua destilada, luego en un baño de agua termostático a 37 °C las partículas se equilibran. La utilización del sistema SSF fue también reducir las inversiones de capital de las instalaciones para el proceso de producción de bioetanol ya que el proceso utiliza un reactor menos que en el caso del modo SHF, ahorrando tiempo y energía ya que no se realiza la etapa de calentamiento del medio a 60 °C [54].

3.1.2.b Filtro. El filtro de prensa tiene como finalidad separar los líquidos y sólidos (Levadura *S. Cerevisiae*) a través de filtración por presión del flujo principal para así poder comercializarla. Es capaz de comprimir y deshidratar sólidos hasta obtener del 25% al 60 % por peso del compactado, con una eficiencia aproximada del 95 % [peso/peso], a través de poros de 25 mm[55].

3.1.3 Separación

A continuación, se describen los procesos que se llevan a cabo en el tercer y último grupo categorizado como separación de la biomasa.

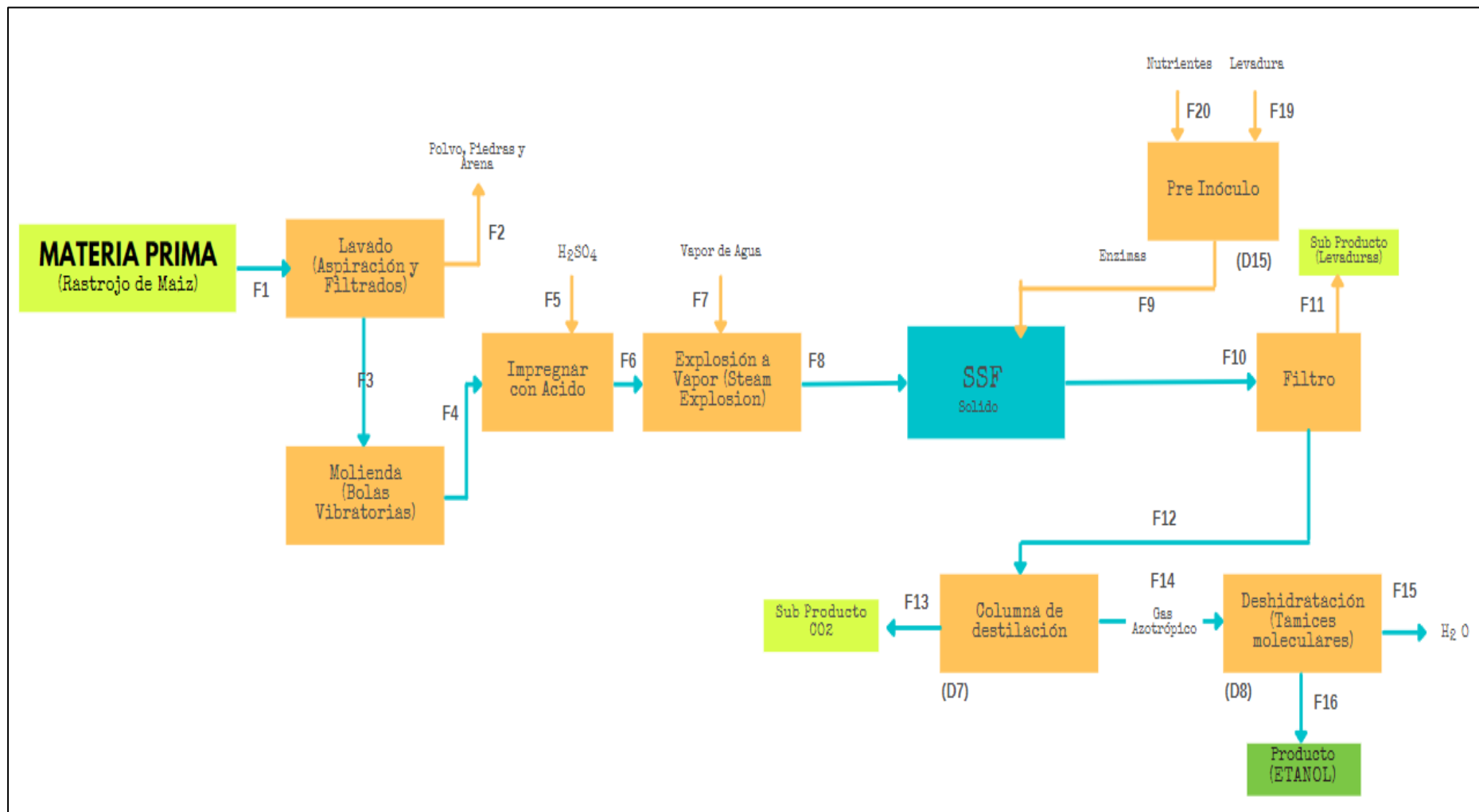
3.1.3.a Columna de destilación binaria. En la columna de destilación binaria se llevan a cabo los procesos de destilación y adsorción con tamices moleculares que se usan para recuperar el etanol del caldo de fermentación obteniéndose etanol a 99,5 % en peso de pureza. La destilación se lleva a cabo en dos columnas, la primera remueve el CO₂ disuelto (que es enviado a la torre de absorción) y la mayoría del agua obteniéndose un destilado con 50 % en peso de etanol y unos fondos con una composición inferior al 0,1 % en peso; en esta columna se alimenta junto al caldo de fermentación el etanol recuperado en la absorción proveniente de los gases de fermentación. La segunda columna concentra el etanol hasta una composición cercana a la azeotrópica [21]. Los condensados de los evaporadores son recolectados junto con los fondos de la segunda columna de destilación y utilizados como agua de proceso. Esta columna tiene una eficiencia global del 80 %.

3.1.3.b Deshidratación. Este proceso tiene como finalidad deshidratar el agua contenida en el bioetanol donde se debe utilizar tamices moleculares, que adsorben el agua [40].

En la Figura 13, se establece el diagrama de flujo para la planta de producción de bioetanol partiendo de las etapas anteriormente mencionadas.

Figura 13.

Diagrama flujo producción de etanol.



Nota. Diagrama de flujo para la producción de etanol a partir del rastrojo de maíz.

3.2 Modelo de desarrollo

Este modelo se basa en el proceso de sacarificación-fermentación simultánea, el cual permite aumentar la eficiencia de la fermentación porque al mismo tiempo que se producen los azúcares que alimentan las levaduras, estos mismos azúcares son consumidos anaeróticamente; lo anterior debido a que en las grandes concentraciones de glucosa empiezan a actuar como tóxicos, aún más que la presencia de etanol en el medio. Esta forma de operar, además de aminorar el número de reactores requeridos para el proceso total, conlleva a un gasto menor de equipamiento y proceso [56]. Sin embargo, no se deben incorporar todas las complejidades del sistema para desarrollar un modelo efectivo; la preferencia general es minimizar el número de parámetros del modelo.

Suponiendo que las tasas de sacarificación inicial normalizadas durante la hidrólisis secundaria de sustratos residuales para el rastrojo de maíz son indicativas de la reactividad del sustrato, se propone la siguiente correlación:

$$R_s = a \frac{S}{S_0} \quad (1)$$

Donde R_s es un parámetro de reactividad del sustrato, a es una constante adimensional, S es la concentración del sustrato en un momento dado, S_0 es la concentración inicial de sustrato y S/S_0 es la concentración de sustrato adimensional en un momento dado.

3.2.1 Adsorción de enzimas

El modelo de adsorción de Langmuir se ha utilizado para describir la adsorción de enzimas en sustratos lignocelulósicos sólidos, útil para describir matemáticamente el fenómeno de la adsorción de enzimas y la hemos utilizado en este estudio. La temperatura en la sacarificación se captura a través de la relación de velocidad de Arrhenius indicada en la ecuación 2 en un rango entre $30\text{ }^\circ\text{C} \leq T \leq 55\text{ }^\circ\text{C}$; Para este caso se utiliza una preparación de enzimas mesófilas con una temperatura óptima de $50\text{ }^\circ\text{C}$. (Las variables y unidades de control usadas en las ecuaciones de Langmuir y

Arrhenius se encuentran en la Tabla 5)

$$\begin{aligned}
 & \textbf{Ecuación de Arrhenius} \\
 R_{ir(T2)} &= R_{ir(T1)} e^{-E_{ai}/R\{1/T1-1/T2\}} \quad (2)
 \end{aligned}$$

El potencial de complicados fenómenos de inhibición del azúcar junto con la presencia de tipos de reacción tanto heterogéneos como homogéneos, requiere un modelo sofisticado para simular el sistema de manera efectiva. El modelo de adsorción de Langmuir se muestra en la siguiente ecuación.

$$\begin{aligned}
 & \textbf{Isoterma de Langmuir} \\
 E_{iB} &= \frac{E_{imax}K_{iad}E_{iF}S}{1 + K_{iad}E_{iF}} \quad (3)
 \end{aligned}$$

A continuación, veremos las ecuaciones de velocidad basadas en un modo competitivo de la inhibición del azúcar (4,5,6).

La ecuación 4 describe la conversión de celulosa en celobiosa (Reacción de celulosa a celobiosa con inhibición competitiva de glucosa, celobiosa y xilosa).

$$r_1 = \frac{R_{1r}E_{1B}R_S R}{1 + \frac{G_2}{K_{1IG2}} + \frac{G}{K_{1IG}} + \frac{X}{K_{1IX}}} \quad (4)$$

La ecuación 5 muestra la conversión de celulosa en glucosa (Reacción de celulosa a celobiosa con inhibición competitiva de glucosa, celobiosa y xilosa)

$$r_2 = \frac{R_{2r}(E_{1B}+E_{2B})R_S S}{1 + \frac{G_2}{K_{2IG2}} + \frac{G}{K_{2IG}} + \frac{X}{K_{2IX}}} \quad (5)$$

La ecuación 6 (Reacción de celulosa a celobiosa con inhibición competitiva de glucosa, celobiosa y xilosa) refleja la conversión de celobiosa en glucosa.

$$r_3 = \frac{R_{3r}E_{2F}G_2}{K_{3M}(1 + \frac{G_2}{K_{3IG}} + \frac{X}{K_{3IX}}) + G_2} \quad (6)$$

Kiran L Kadam et al. [57] plantea las cinéticas de reacción presentes en las enzimas de sacarificación para biomazas lignocelulósicas, para el cual se tomó como valor inicial en flujo de 82.671 Kg/día a la entada del reactor para la sacarificación y fermentación simultaneas, con el cual se hace el respectivo modelamiento matemático.

Tabla 5.

Variables y unidades de control

Notación	Descripción	Unidades
E_a	Energía de activación	cal/mol
E_T	Concentración total de encima	g/kg
E_B	Concentración enlaces de encima	g/kg
E_F	concentración de enzima libre	g/kg
E_{1B}	Concentración enlace de CBH y EG	g/kg
E_{2B}	Concentración enlace de β -glucosidasa	g/kg
E_{2F}	Concentración de β -glucosidasa en solución	g/kg
$E_{m\acute{a}x}$	Masa máxima de enzima que puede adsorberse en una unidad de masa de sustrato	g proteina/g celulosa
G	Concentración de glucosa	g/kg
G_2	Concentración de celibiosa	g/kg
K_{ad}	Constante de disociación para la adsorción enzimática/reacción de desorción	g proteina/g celulosa
k_{ir}	Constante de velocidad de reacción	kg/g.h
K_{iG}	Constante de inhibición de la glucosa	g/kg
K_{iG2}	Constante de inhibición de la celobiosa	g/kg
K_{iX}	Constante de inhibición de la xilosa	g/kg
K_{3M}	Constante de saturación del sustrato (celobiosa)	g/kg
r_i	Velocidad de reacción	g/kg.h
R	Constante universal de los gases	cal/mol.K
R_s	Reactividad del sustrato	g/kg
S	Concentración de sustrato	g/kg
T	Temperatura	K
X	Concentración de xilosa	g/kg
α	constante que relaciona la reactividad del sustrato con el grado de hidrólisis	-

Nota. Variables utilizadas en modelos matemático establecido por la literatura y sus unidades de control.

Los parámetros establecidos de forma independiente se usaron como entrada para el modelo, y los parámetros cinéticos se sometieron posteriormente a una regresión; en las Tablas 6 y 7 se enumeran las estimaciones de mejor ajuste de estos parámetros. Se intentó una comparación entre los parámetros enumerados en la tabla 5 y los obtenidos en la literatura [58], quienes determinaron el parámetro de inhibición competitiva de la glucosa. Su método consistía en determinar la tasa inicial de consumo de celobiosa durante la etapa SSF y volver a calcular las tasas de conversión de celobiosa en glucosa

Tabla 6.

Parámetros estimados del modelo.

Parámetro	Valor
K1ad (g proteína/g sustrato)	330,7
K2ad (g proteína/g sustrato)	82,7
E1máx (g proteína/g sustrato)	49,6
E2máx (g proteína/g sustrato)	8,3
Ea (cal/mol)	4579973,4
Rs	$\alpha S/S_0$; $\alpha=1$

Nota. Regresión de valores obtenidos en la literatura contra nuestros datos de entrada:

Tabla 7.

Parámetros obtenidos por regresión de datos de sacarificación.

Parámetro	Valor
Rs (g/mg,h)	18435,6
K1IG2 (g/kg)	12,4
K1IG (g/kg)	82,7
K1IX (g/kg)	82,7
k2R (g/mg,h)	5935,8
K2IG2 (g/kg)	109125,7
K2IG (g/kg)	33,1
K2IX (g/kg)	165,3
k3R (h-1)	236025,7
K3M (g/kg)	20089,1
K3IG (g/kg)	3224,2
K3IX (g/kg)	166168,7

Nota. Regresión de valores obtenidos en la literatura contra nuestros datos de entrada:

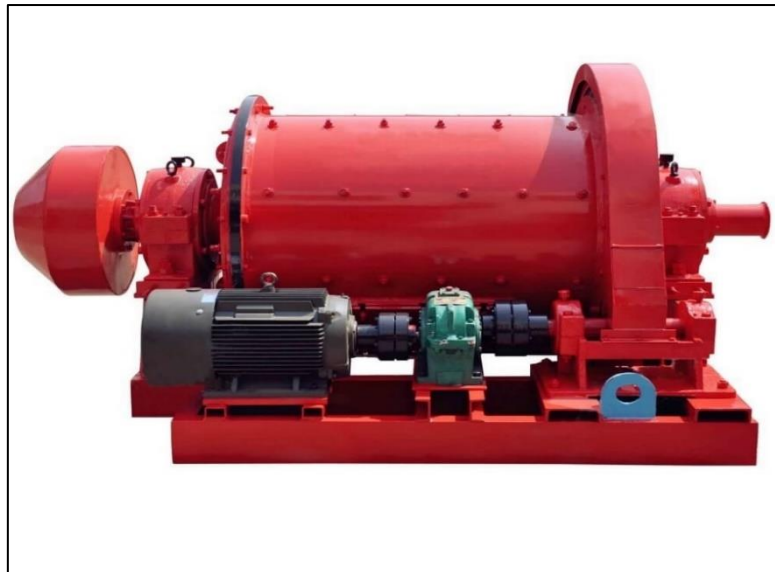
3.3 Equipos

En este capítulo se mencionan los principales equipos, de acuerdo con las tres etapas necesarias para la producción de bioetanol.

3.3.1 Pretratamiento - Molino de bolas

Consiste en un cilindro horizontal de acero en movimiento giratorio que contiene los medios de molienda y las partículas a ser molidas. Funciona por el principio de impacto y atrición: la reducción de medida se obtiene por impacto al caer las bolas desde arriba del cilindro. La masa se mueve hacia arriba sobre las paredes del cilindro mientras está en rotación y cae al pie de la masa en movimiento cuando la fuerza de gravedad excede la fricción. Una reducción de tamaño fina e intermedia por molienda es frecuentemente lograda en un molino de bolas en el cual, la longitud de cilindro es 1 a 1.5 veces el diámetro [59].

Figura 14. Molino de bolas.



Nota. Molino de bolas, equipo utilizado en la etapa del pretratamiento para la reducción de la biomasa en partículas más pequeñas. Tomado de 911 Metallurgist [En línea]:<https://www.911metallurgist.com/metalurgia/molino-de-bolas/#lg=1&slide=0> [Acceso: abr.17, 2022]

3.3.2 Pretratamiento - Reactor de explosión a vapor

Se utiliza para reacciones químicas con características de sello magnético (estática

sello) no fuga, suave correr, bajo ruido y fácil operación. Se usa en reacciones de alta temperatura y presión para este caso 50 °C y 600 psi respectivamente [60].

Los principales factores que afectan la eficiencia de una explosión a vapor son el tamaño de las partículas, el contenido de humedad, la temperatura, la presión, el tiempo de procesamiento y los efectos combinados de la temperatura y el tiempo.

Un equipo de explosión súbita de vapor cuenta con los siguientes componentes: fuente de vapor, que consiste en un tanque fabricado bajo el diseño de caldera, con transmisión y liberación de presión y temperatura, operada automáticamente. El reactor, un tanque de acero inoxidable en forma de cono, donde el diámetro de entrada de vapor es menor al diámetro de salida del producto procesado [61]. El tanque receptor, que sirve para el depósito del material procesado.

Figura 15.

Equipo explosión a vapor.



Nota. Equipo para realizar la explosión a vapor, GMP Stainless Steel Limpet Jacket Apis Chemical Polymer Unsaturated Resin Decarbon Reactor Crystallizer Tank. Tomado de Made in China [En línea]: <https://yinuomachine.en.made-in-china.com/productimage/BdrTLzYDgghl-2f1j00zeghcRLBnqbj/China-GMP-Stainless-Steel-Limpet-Jacket-Apis-Chemical-Polymer-Unsaturated-> [Acceso: abr.18, 2022]

3.3.3 Fermentación - Tanque de Fermentación

Se utiliza principalmente para inocular la levadura después de enfriamiento de la mezcla, para proporcionar un entorno adecuado para la conversión de la celulosa en alcohol [62].

Figura 16.

Tanque de fermentación.



Nota. Tanque de fermentación utilizado en la industria. Tomado de Machine Genyond, lant nuts soy milk plant milk processing line [En línea]: https://www.genyondmachine.com/plant-nuts-soy-milk-plant-milk-processing-line_p57108.html [Acceso: abr.20, 2022]

3.3.4 Fermentación – Filtro tipo batch

La filtración a presión es un método muy efectivo para separar sólidos de líquidos, ya sea que el producto sea sólido o líquido. El consumo energético requerido es mínimo y en la mayoría de los casos la filtración a presión no requiere una temperatura determinada, preservando así el producto de cualquier choque térmico. La filtración a presión se suele realizar en recipientes presurizados, evitando al máximo la contaminación del producto o del medio ambiente [63].

Una vez que todas las cámaras del filtro están llenas de producto, comienza el proceso de filtración a presión y la bomba de alimentación separa la mezcla. Las partículas sólidas quedan en la cámara del filtro debido a la barrera de la tela del filtro y el filtrado se descarga a través de la tela filtrante a lo largo del canal de drenaje en la placa del filtro, y el filtrado no se descarga, es decir, se completa el proceso de deshidratación [63].

Figura 17.

Filtro prensa tipo Batch



Nota. Filtro continuo tipo batch. Tomado de 3v Tech, Continuous Filter - Rotapress FRP/HCT [En línea]: <https://www.3v-tech.com/en/process-equipment/11/filters/29/continuous-filter-rotapress-frphct> [Acceso: abr.25, 2022]

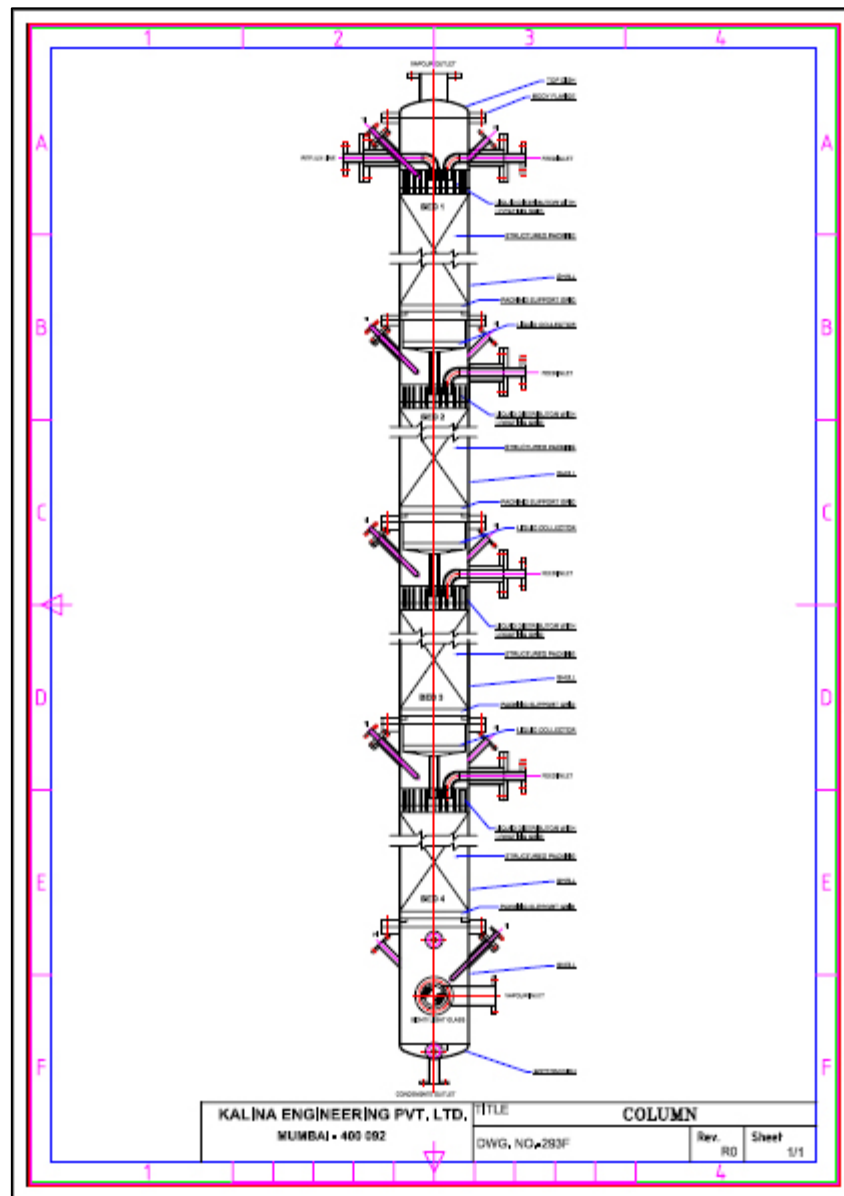
3.3.5 Separación - Columna de destilación binaria

Su principio de funcionamiento es utilizar el bajo punto de ebullición del alcohol, la solución de alcohol disuelta se calienta a una temperatura un poco más alta que el punto de ebullición del alcohol [64]. Al destilar por la torre, el gas alcohol se volatiliza para mejorar la concentración de solución de alcohol y realizar la recuperación del

alcohol. El dispositivo puede destilar el diluir el alcohol de 30 % - 50 % a 90 % a 95 % y el líquido residual es dado de alta con un bajo contenido de alcohol y cumple con los requisitos de protección ambiental.

Figura 18.

Columnas de destilación binaria.



Nota. Plano de diseño de una columna de destilación. Tomado de Reactores. [En línea]: <https://www.reactoresquimicos.com/fabricante-columnas-destilacion/> [Acceso: abr.129, 2022]

4. BALANCES

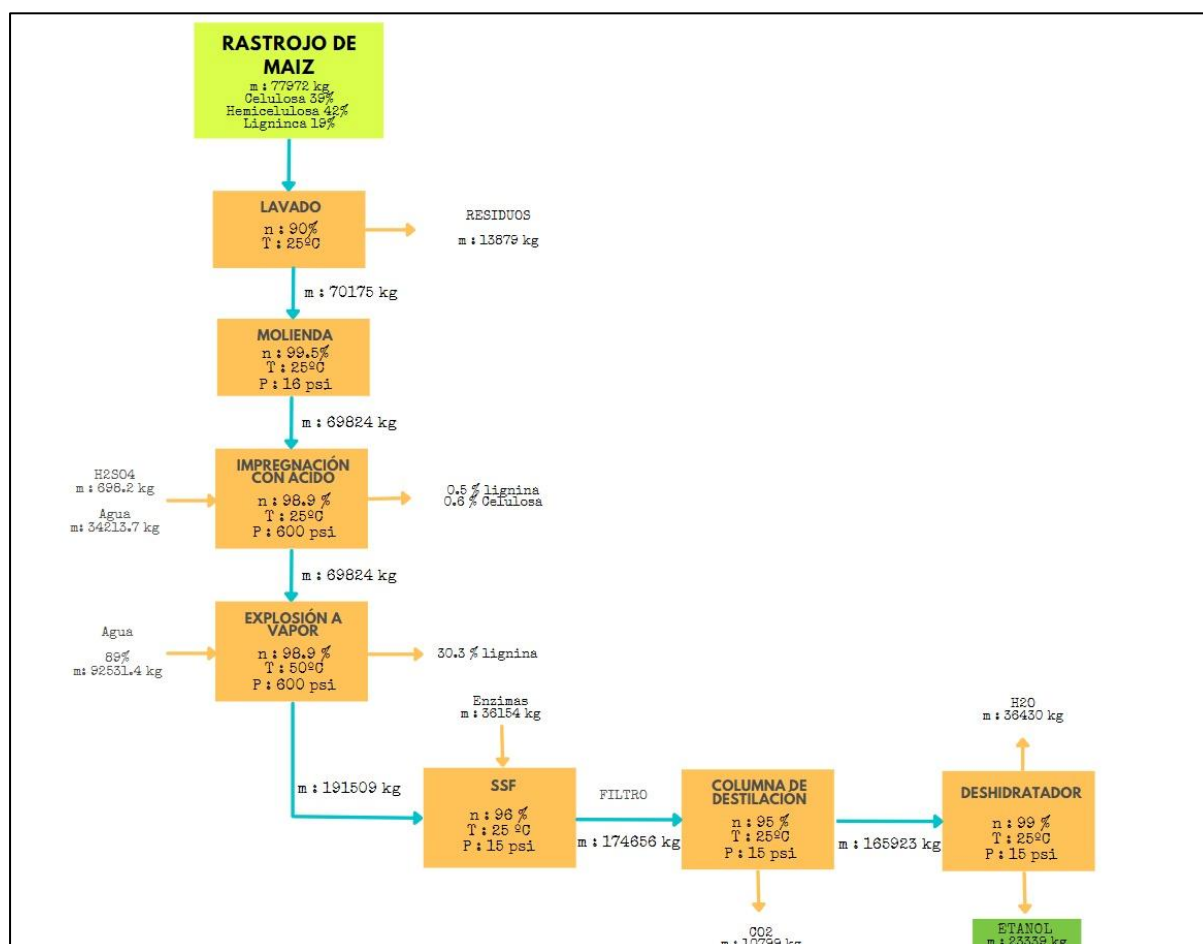
En el presente capítulo se establecerán los balances de masa y energía presentes en el proceso establecido para la producción de etanol a partir del rastrojo de maíz.

4.1 Balance de masa

Para realizar el balance de masa de la planta conceptual del proyecto, se realizó un estudio bibliográfico de los procesos involucrados. En la figura 19, se muestra el balance general para todos los procesos presentes en la obtención de bioetanol (operando la planta durante 330 días del año, 24 horas al día), allí se podrán ver los flujos del proceso, un detalle de los flujos importantes y una relación del rendimiento de la materia prima con respecto a los productos de la biorrefinería.

Figura 19.

Balance de masa por equipo.

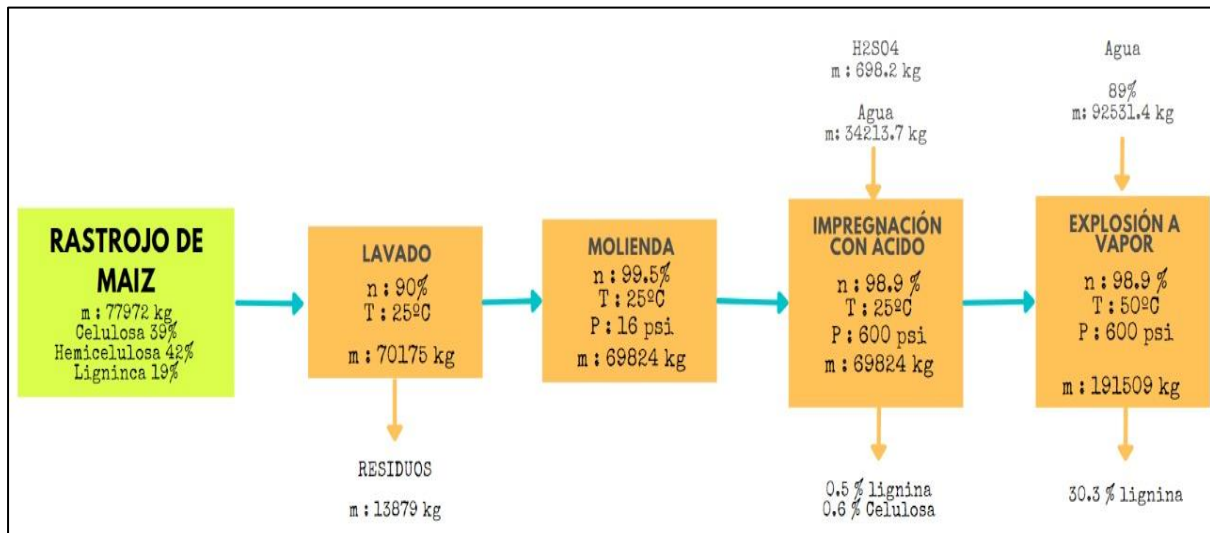


Nota. Balance de masa por equipo para la producción de etanol.

A continuación, se presenta el balance de masa para cada una de las etapas ya mencionadas: pretratamiento (Ver Figura 20), fermentación (Ver Figura 21) y separación (Ver Figura 22). Evidenciando de manera más detallada el comportamiento de nuestra masa residual.

Figura 20.

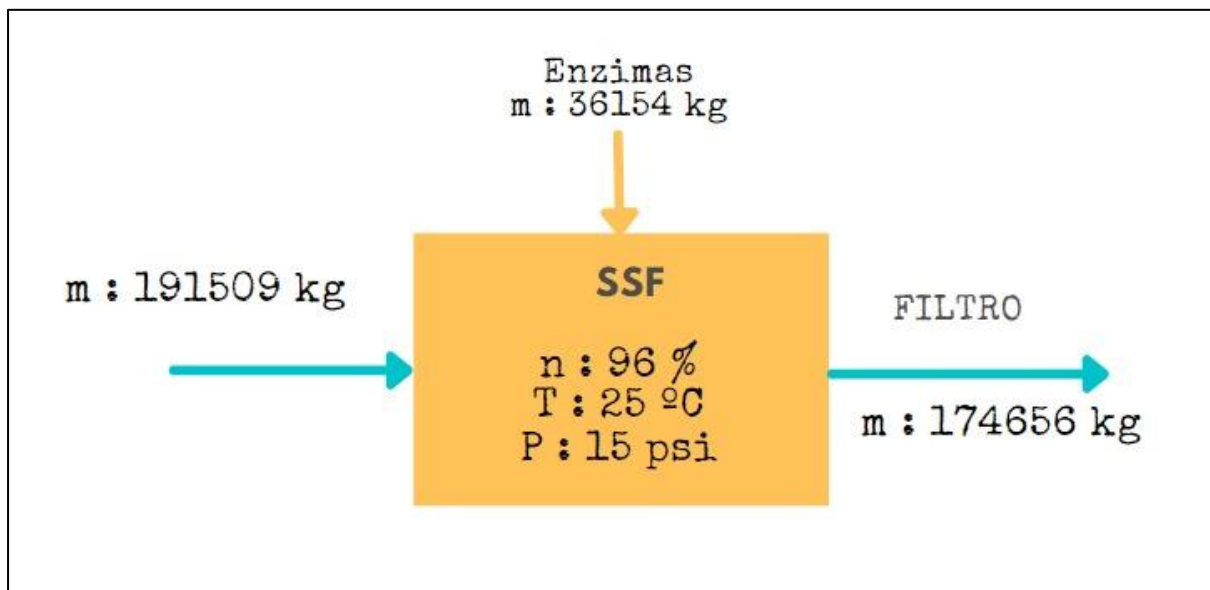
Balance de masa etapa de Pretratamiento.



Nota. Balance de masa para la etapa de pretratamiento, la cuál esta compuesta por los procesos de lavado, moliebda, impregnación con ácido y explosión a vapor.

Figura 21.

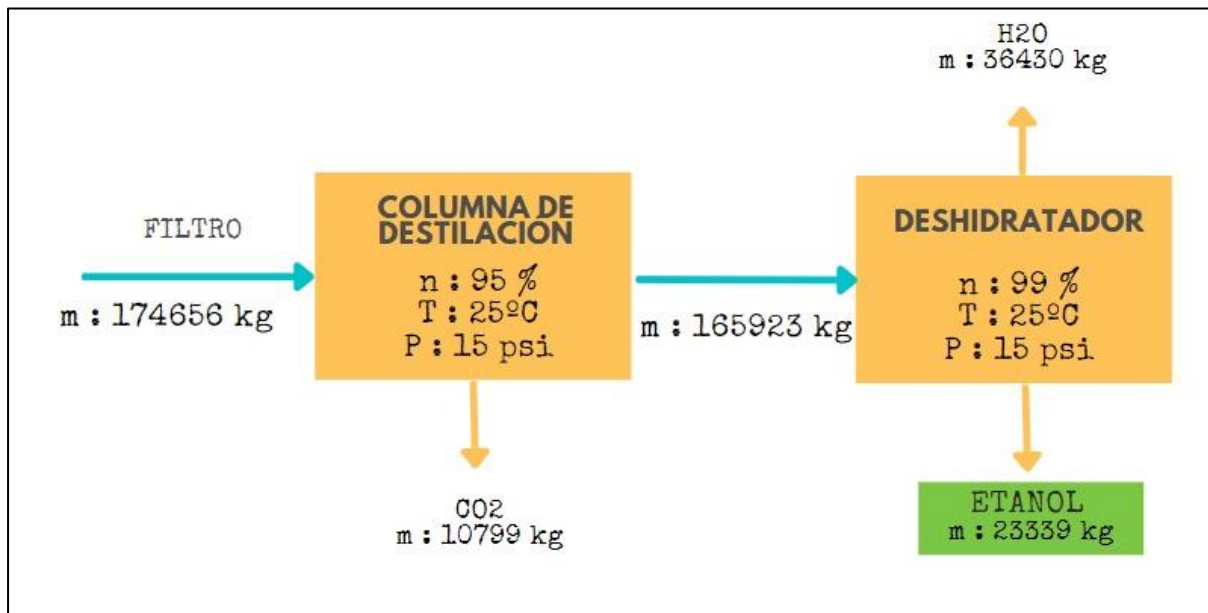
Balance de masa etapa de Fermentación.



Nota. Balance de masa para la etapa de fermentación, la cuál esta compuesta por el procesos de sacarificación y fermentación simultánea.

Figura 22.

Balance de masa etapa de Separación.



Nota. Balance de masa para la etapa de separación, la cuál esta compuesta por los procesos de destilación y deshidratación.

El balance de los productos obtenidos a lo largo del esquema de producción propuesto. Se ve reflejado en la Tabla 8.

Tabla 8.

Productos Obtenidos por día.

Productos Obtenidos por Dia		
Productos Obtenidos	Flujos	Flujo kg
Rastrojo de Maiz	F1	77972
Etanol	F18	23339
Agua	F17	17959
CO ₂	F15	10799
Levadura	F13	2628

Nota. Balance de masa productos obtenidos por día para la producción de etanol.

Por último, en la Tabla 10, se muestra el balance de masa general, donde para cada una de las etapas establecidas en el diagrama de flujo se dan sus respectivos valores.

4.2 Balance energético

De acuerdo con la literatura existen varios modelos termodinámicos que pueden ser aplicados para realizar la simulación del proceso de obtención de etanol. El modelo Non Random Two Liquids (NRTL) como lo menciona José Luis Montiel [65], es el más adecuado para el proceso planteado; debido a la presencia de componentes polares, posibles mezclas azeotrópicas en la etapa de purificación de etanol, al igual que la presencia de dos fases líquidas en algunas etapas del proceso.

Partiendo de los valores obtenidos por los autores luego de realizar la simulación usando el método NRTL, se realiza una regresión teniendo como datos de entrada los valores obtenidos en el balance de masa. En la Tabla 9 encontramos los valores de entalpía para varias etapas, tomando como flujo másico el rastrojo de maíz, con un valor de 4.332 kg/h y vapor de 3.855,4 iniciando en la explosión de vapor.

Tabla 9.

Balance Energía

Etapa	ENTALPÍA (GJ/h)
Explosión de Vapor	-62451,42559
SSF	-470,885604
Filtro	-817,685928
Columna Destilación	-430,440072
Deshidratación	-405,058722

Nota. En la tabla se presentan los valores obtenidos para el balance de masa a partir de los datos encontrados en la literatura.

Tabla 10.

Flujos involucrados en el proceso de obtención de bioetanol (Kg/día).

	F1	F2	F3	F4	F5	F6	F7	F8	F9	F10	F11	F12	F13	F14	F15	F16	F17	F18
Lignina	14814,7	7,8	14806,9	16751,2	-	16751,2	-	15947,2	-	58373,7	-	6535,6	-	-	-	-	-	-
Celulosa	30409,1	5,1	30403,9	50948,4	-	50948,4	-	48502,9	-	46562,8	-	1013,2	-	-	-	-	-	-
Hemicelulosa	32748	-	32748,2	27932,7	-	27932,7	-	26591,9	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Xilosa	-	-	-	27932,7	-	27932,7	-	26591,9	-	5056,6	-	-	-	-	-	-	-	-
Agua	-	-	-	13756,1	34213,7	47969,8	92531,4	45667,3	-	1100,5	-	1048,0	-	-	17958,9	-	-	-
H2SO4	-	-	-	-	698,2	698,2	-	664,7	-	-	-	132214	-	-	-	-	-	-
Inhibidores	-	-	-	-	-	-	-	2825,3	-	1080,7	-	1029,2	-	-	-	-	-	-
Etanol	-	-	-	-	-	-	-	-	-	24176,3	-	23692,8	-	23455,9	-	23338,6	-	-
CO2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	9349,6	-	10910,4	10799,3	-	-	-	-	-
Levaduras	-	-	-	-	-	-	-	-	36153,8	36153,8	2627,9	-	-	-	-	-	7703,8	-
Nutrientes	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1,0
Residuos	-	13866,1	-	-	-	-	-	-	-	1994,4	-	1897,3	-	235,2	18324,0	-	-	-
Glucosa	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	28450
	77972	13879	70175	69824	34912	103968	92531	191509	36154	183848	2628	174656	10799	165923	364430	23339	7704	28451
Temperatura (°C)	25	25	25	25	25	25	200	200	50	50	25	25	45	45	25	25	25	25
Presion (psi)	15	16	16	17	600	600	600	600	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15

Nota. Balance de masa proceso de producción de etanol a partir del rastrojo de maíz, tomando como base la literatura. Fuente:

5. ANÁLISIS DE RESULTADOS

Habiendo determinado el flujo másico y la materia disponible para el proceso de fermentación y sacarificación en simultánea, se realizó la cinética de reacción para este proceso, de esta manera fue necesario calcular el tiempo de duración de acuerdo con lo revisado en la literatura.

Allí se encontró la ecuación que se verá a continuación, la cual describe la concentración de etanol basándose en la materia prima seleccionada, que en este caso es el rastrojo de maíz.

$$P = P_m * \exp \left(\exp \left(- \exp \left(\frac{rpm * \exp(1)}{P_m} \right) * (tl - t) + 1 \right) \right) \quad (7)$$

De acuerdo, a los valores hallados en la literatura se encontraron los siguientes valores de entrada para el bagazo del maíz.

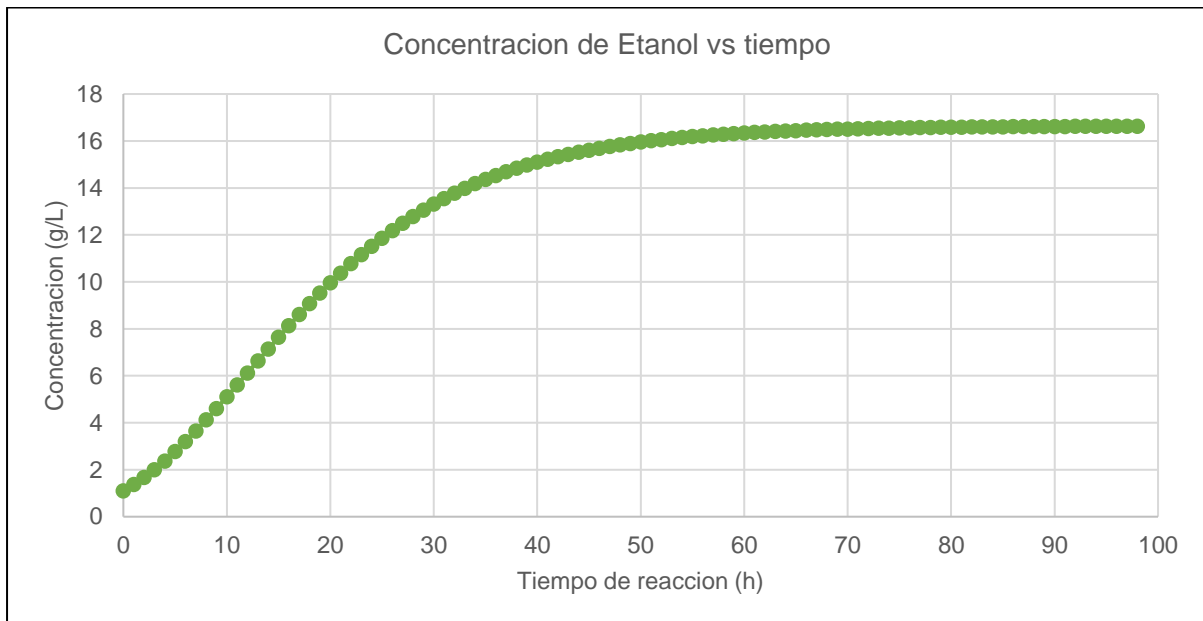
$$P_m = 16.64 \frac{g}{L} \quad rpm = \frac{0.51 \frac{g}{L}}{h} \quad tl = 0 \quad (8)$$

Con el objetivo de determinar el tiempo adecuado en el reactor, se estimaron diferentes valores de concentración de acuerdo con la ecuación expresada previamente, de esta manera se evidencia que el tiempo óptimo de reacción es donde se empieza a ver un comportamiento constante de la concentración, lo anterior se puede observar en la Figura 14.

Como se observa en la Figura 14, la concentración presenta un comportamiento constante a partir de 50 h con una concentración de 15.95 g/L, analizando de esta manera que se requiere almacenar durante 50 h el flujo másico proveniente de la explosión a vapor con el objetivo de optimizar los tiempos de reacción y el uso de los equipos.

Figura 23.

Concentración del Etanol.



Nota. Concentración de etanol en el tiempo.

Es decir que para el uso del reactor se requiere almacenar previamente 48.5 toneladas de celulosa de rastrojo de maíz y en total para la materia prima inicial se haría uso de 191.5 toneladas en el proceso de sacarificación y fermentación en simultanea durante un día.

$$\text{Celulosa requerida para la cinetica de reaccion en SSF} = \frac{0.39\text{kg}}{\text{s}} * \frac{3600\text{s}}{1\text{h}} * 50\text{ h}$$

$$\text{Celulosa requerida para la cinetica de reaccion en SSF} = 70200,0\text{ kg}$$

$$\text{Celulosa requerida para la cinetica de reaccion en SSF} = 70,2\text{ton}$$

$$\begin{aligned} \text{Total Materia prima requerida para SSF} = \\ \text{materia disponible explosion a vapor} * \% \text{ celulosa} \end{aligned}$$

$$\text{Total Materia prima requerida para SSF} = 70,2\text{ ton} * 69.4\%$$

$$\text{Total Materia prima requerida para SSF} = 48.5\text{ ton por dia}$$

Ahora bien, es necesario encontrar la máxima utilización de glucosa en el proceso de SSF, para esto en base a la literatura se realizó el siguiente cálculo:

Maxima utilizacion de Glucosa

$$= \frac{\text{Limite encontrado en la cinetica de reaccion } \left(\frac{g}{L}\right)}{\text{Limite teorico de concentracion a obtener } \left(\frac{g}{L}\right)} * 100$$

$$\text{Maxima utilizacion de Glucosa} = \frac{15.95 \left(\frac{g}{L}\right)}{16.64 \left(\frac{g}{L}\right)} * 100$$

$$\text{Maxima utilizacion de Glucosa} = 95.87\%$$

Es importante mencionar que en este proceso deben ingresar enzimas encargadas de la generación de glucosa, de forma que de acuerdo con la literatura se indica que al reactor ingresan aproximadamente el 4 % de enzimas para este proceso es decir que se ingresaría al reactor 7660,3 kg de materia prima y en total por año se ingresarían 2757.7 toneladas.

$$\text{Materia prima aprovechada} = \text{ton de glucosa} * \text{Eficiencia del SSF}$$

$$\text{Materia prima aprovechada} = 28.45 \text{ ton de glucosa} * 95.87\%$$

$$\text{Materia prima aprovechada} = 28450 \frac{kg}{dia} \text{ de glucosa}$$

Finalmente, se calcula el etanol obtenido en el proceso de sacarificación y fermentación en simultánea relacionando la concentración obtenida en las 50 h de reacción con la materia prima a aprovechar.

$$\text{Etanol obtenido en SSF} = \text{Materia prima aprovechada} * \text{densidad de etanol}$$

$$\text{Etanol obtenido en SSF} = \frac{24176,3 \frac{kg}{dia}}{0,789 \frac{kg}{L}} = 30641,7 \frac{L}{dia}$$

$$\text{Etanol obtenido en SSF} = 30641,7L \text{ de etanol en cada proceso de SSF}$$

Tras el paso por la columna de destilación y el deshidratador de tamices moleculares del etanol obtenido del proceso SSF, se obtuvo, que por una tonelada de rastrojo de maíz que ingresa a la planta se obtiene 379,4 litros de bioetanol puro y listo para ser usado en la industria. Es decir, que al final del año se obtiene

$$\textit{Etanol producido por dia} = \frac{23338,6 \frac{\textit{kg}}{\textit{dia}}}{0,789 \frac{\textit{kg}}{\textit{L}}} = 29580 \frac{\textit{L}}{\textit{dia}}$$

$$\textit{Etanol producido anualmente} = \textit{Etanol producido por dia} * 360 \textit{dias}$$

$$\textit{Etanol producido anualmente} = 29580 \frac{\textit{L}}{\textit{dia}} * 360 \textit{ dias} = 10'648.794,3 \textit{ L}$$

El porcentaje de celulosa obtenido después de la explosión a vapor es usado para la obtención del producto principal Bioetanol; sin embargo, también se obtiene a partir de la explosión a vapor un porcentaje de lignina la cual cuenta con un alto potencial para ser aprovechada como fuente para la generación de energía eléctrica a través del ciclo Rankine.

6. ANÁLISIS DE IMPACTO AMBIENTAL

En el proceso de obtención de bioetanol a partir del rastrojo de maíz, se evidencia que a la salida de las columnas de destilación se presenta la emisión de dióxido de carbono (CO₂), el cual da como resultado que por 1 ton de la materia prima en estudio se generan 138.5 kg de dióxido de carbono.

6.1 Emisiones de contaminantes mediante la combustión de etanol

El parque automotor es el principal consumidor de combustibles líquidos, al momento que un motor realiza el proceso de combustión genera varios subproductos, conocidos como emisiones, entre los cuales se destacan los hidrocarburos, gases como el monóxido de carbono, los óxidos de nitrógeno y el dióxido de carbono (CO₂).

Con el objetivo de cuantificar las reducciones de CO₂ presentes en la combustión del bioetanol, se realiza una comparación de la composición química presente en combustibles líquidos como la gasolina, el diésel y el etanol. En la Tabla 11 se presentan estos valores, donde se evidencia que en el etanol se presenta en menor proporción elementos como el carbono y el hidrógeno; lo cual representa menores emisiones de CO₂.

Tabla 11.

Características de combustibles líquidos.

Composición Química	Gasolina	Etanol	Diesel
% Carbono	85-88	52,14	55,9
%Hidrógeno	12-15	13,12	14-15
%Oxígeno	Variable	34-74	Variable

Nota. Comparación de la composición química presentes en combustibles líquidos como el etanol, diésel y gasolina.

En comparación, quemar etanol es menos contaminante. Gracias a que ya contiene oxígeno integrado en el combustible, lo que puede conducir a una combustión más uniforme. Se quema más rápido que la gasolina y no contiene elementos adicionales como azufre y fósforo.

Todos estos factores favorecen al etanol en términos de emisiones, al igual que las

bajas temperaturas de escape tienden a reducir específicamente las emisiones de NO_x (óxido de nitrógeno). La baja temperatura de los gases de escape cuando se usa etanol asegura una mezcla de combustión equilibrada en todo el rango operativo[66].

Muchos colombianos desconocen los beneficios de los biocombustibles, en el caso de las gasolinas, su oxigenación con alcohol carburante mejora el octanaje y reduce las emisiones de CO₂. Las importaciones de alcohol carburante, como respaldo de la producción nacional, han maximizado estos beneficios.

Mezclar etanol y diésel es el método más sencillo, fue aprobado en 1954 por Haveman y Rao, pero presentó algunos problemas. Uno de ellos es la separación de los componentes cuando se presenta agua en la mezcla [67].

Tabla 12.

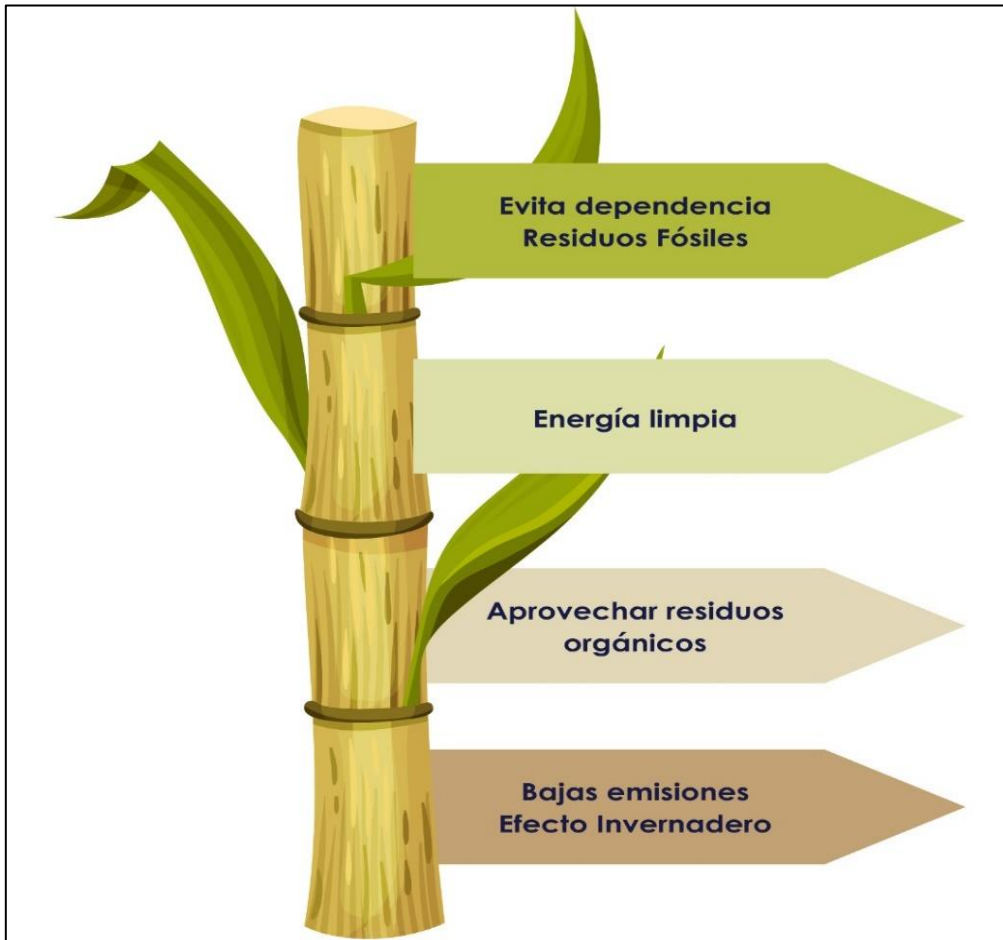
Reducción emisiones dióxido de carbono.

Tipo de Mezcla	% de Reducción
Emisiones de Efecto Invernadero (E10)	1-4%
Emisiones de Efecto Invernadero (E20)	2-11%
Emisiones de Efecto Invernadero (E85)	19-70%

Nota. Porcentajes de reducción del gas dióxido de carbono dependiendo la mezcla de etanol.

Figura 24.

Beneficios ambientales uso bioetanol.



Nota. Beneficios ambientales al hacer uso del bioetanol como combustible.

7. ANÁLISIS ECONÓMICO DEL PROYECTO

El procedimiento utilizado, es la comparación del costo de venta de bioetanol con los combustibles fósiles, para así determinar el potencial del negocio en el mercado y a su vez analizar como los niveles de concentración impactan en el costo final. Ver Tabla 13.

Tabla 13.

Comparación costos combustibles.

Periodo	Bioetanol 2022	Gasolina 2022	Diesel	Biodiesel
ene-22	\$ 10.101,3	\$ 9.048,0	\$ 8.884,0	\$ 21.553,0
feb-22	\$ 10.101,3	\$ 9.046,0	\$ 8.871,0	\$ 21.553,0
mar-22	\$ 10.101,3	\$ 9.030,0	\$ 8.868,0	\$ 21.553,0
abr-22	\$ 10.101,3	\$ 9.030,0	\$ 8.868,0	\$ 21.553,0
may-22	\$ 10.101,3	\$ 9.030,0	\$ 8.868,0	\$ 21.553,0
Promedio	\$ 10.101,3	\$ 9.036,8	\$ 8.871,8	\$ 21.553,0

Nota. precio combustibles año 2022. Tomado de: Ministerio de minas y energía.

Conociendo el costo de venta del etanol en el 2022, se procede a calcular los ingresos generados con la venta del producto, dando que ingresos generados por la venta de bioetanol son por un valor mayor a cien mil millones de pesos.

$$2.817.141 \text{ Gal} * \$10.101,00 = \$28.453.126.825$$

Además, el Ministerio de minas y energía publicó la Resolución 40421 del 2021, cuyo articulado busca llevar el nivel del biocombustible - biodiésel al 11 % y desde marzo que el nivel quede definitivamente en el 10 %. Ver tabla 14 [68].

Tabla 14.

Comparación costos mezclas de combustibles.

Mezcla Combustible	Concentración E5	Concentración E10	Concentración E15
Gasolina - Etanol	\$ 9.090,02	\$ 9.143,25	\$ 9.196,47
Diesel- Etanol	\$ 8.933,27	\$ 8.994,75	\$ 9.056,22

Nota. Precio mezcla de combustibles año 2022. Tomado de: Ministerio de minas y energía.

Como se evidencia en la anterior tabla el costo de la mezcla de combustible varía la concentración de etanol en esta, pero su aumento es muy poco y los beneficios que

trae para los vehículos en sus motores, además de la disminución de contaminación ambiental es el valor agregado que está proponiendo el gobierno para bajar los gases de efecto invernadero.

Para la estimación de los costos de los equipos se realizó una investigación de su valor a través de los diferentes portales, debido a que la información de la tecnología requerida solo está disponible para personas vinculadas a empresas asociadas a este sector. En la Tabla 15, se enlistan la cantidad de equipos y su costo comercial.

Tabla 15.

Costo de Capital.

Equipos	Valor Comercial	Cantidad
Molino de bolas	\$ 3.659.481.184,00	1
Reactor de Explosión a vapor	\$ 2.790.403.118,00	1
Tanque de Fermentación	\$ 3.719.887.955,00	3
Filtro tipo Batch	\$ 931.433.443,00	1
Columna de Destilación Binaria	\$ 4.898.794.300,00	1
Silos	\$ 1.996.974.550,24	2
Tanques de almacenamiento	\$ 7.117.422.114,96	4
Total	\$ 25.114.396.665,20	13

Nota. Listado de la cantidad de equipos y su valor comercial, para determinar el costo de los equipos.

Se necesita de un capital inicial de \$25.114.396.665,20 COP solo para la adquisición de los principales equipos en la producción de Bioteno]. Asumiendo que la mayor inversión se presenta en los equipos y represente un 60 % del valor total se obtiene un costo aproximado global del proyecto de \$684.250.000 COP, como se evidencia en la Tabla 16.

Tabla 16.

Costo de Inversión

Categoría	Valor %	Costo \$
Equipos	60%	\$ 25.114.396.665
Mano de Obra	15%	\$ 3.767.159.499
Locación	25%	\$ 6.278.599.166
Total	100%	\$ 35.160.155.331

Nota. Costo total por categoría que conforma el proyecto, para obtener una inversión total estimada del proyecto.

En la Tabla 17 se realiza el flujo de caja estimado para el proyecto, teniendo en cuenta variables como la nómina, servicios, seguros, manutención de equipos, transporte de la materia prima e insumos. El costo más elevado está reflejado en los insumos, esto debido a que se requieren consumibles como el agua y diésel para la explosión a vapor, las enzimas y levadura para la SSF y el ácido sulfúrico para la impregnación con ácido, entre otros.

Tabla 17.

Flujo de caja

Año	0	1	2	3	4	5	6
Equipos	\$ 25.114.396.665						
Mano de Obra	\$ 3.767.159.500						
Locación	\$ 6.278.599.166						
Nómina		\$ 4.851.624.066	\$ 4.851.624.066	\$ 4.851.624.066	\$ 4.851.624.066	\$ 4.851.624.066	\$ 4.851.624.066
Servicios		\$ 388.129.925	\$ 388.129.925	\$ 388.129.925	\$ 388.129.925	\$ 388.129.925	\$ 388.129.925
Seguros		\$ 843.843.728	\$ 843.843.728	\$ 843.843.728	\$ 843.843.728	\$ 843.843.728	\$ 843.843.728
Manutención de equipos		\$ 452.059.140	\$ 452.059.140	\$ 452.059.140	\$ 452.059.140	\$ 452.059.140	\$ 452.059.140
Insumos		\$ 16.000.000.000	\$ 16.000.000.000	\$ 16.000.000.000	\$ 16.000.000.000	\$ 16.000.000.000	\$ 16.000.000.000
TOTAL EGRESOS	-\$ 35.160.155.331	-\$ 22.535.656.860	-\$ 22.535.656.861	-\$ 22.535.656.862	-\$ 22.535.656.863	-\$ 22.535.656.864	-\$ 22.535.656.865
Ventas		\$ 28.453.126.825	\$ 28.453.126.825	\$ 28.453.126.825	\$ 28.453.126.825	\$ 28.453.126.825	\$ 28.453.126.825
TOTAL INGRESOS		\$ 28.453.126.825	\$ 28.453.126.825	\$ 28.453.126.825	\$ 28.453.126.825	\$ 28.453.126.825	\$ 28.453.126.825
FLUJO	-\$ 35.160.155.331	\$ 5.917.469.965	\$ 5.917.469.964	\$ 5.917.469.963	\$ 5.917.469.962	\$ 5.917.469.961	\$ 5.917.469.960

Nota. Flujo de caja en un periodo de seis años.

A partir de los datos suministrados en el flujo de caja (costos fijo y ventas) se obtiene como resultado que empieza a aumentar la tasa interna del retorno (TIR), a partir de 6 años. Dando así viabilidad para realizar el proyecto, esto debido a que se estima tener ganancias anuales de \$5.917.469.965,80 COP

Haciendo un estudio de antecedentes se encontró un proyecto realizado en Chile [40] en el cual producen 48.164 galones al día de bioetanol. Su análisis económico da un resultado de US\$ 160, insumos US\$ 67 millones, recursos humanos US\$ 917 millones y otros costos fijos para un total de US\$ 3.595 millones. En el cual haciendo una relación proporcional por lo generado en cada una de las plantas se obtuvo que el proyecto en el departamento de Cundinamarca está dentro de los parámetros y valores promedio de este otro caso en estudio.

CONCLUSIONES

El uso de residuos lignocelulósicos tiene un impacto positivo en el medio ambiente en países en vías de desarrollo como Colombia y representa una alternativa viable para reducir los problemas ambientales y energéticos que generan los residuos sólidos. El rastrojo de maíz es una materia orgánica abundante en Cundinamarca gracias a sus características agronómicas.

La producción de bioetanol a partir de rastrojo de maíz es considerada un proceso viable y desarrollable debido a que dicha materia prima contiene en su estructura un alto porcentaje de celulosa, hemicelulosa y lignina que puede ser aprovechada casi en su totalidad, además si se cuenta con un proceso como el seleccionado en este proyecto, la eficiencia de este estará por encima del 90 % para la generación de este biocombustible.

La producción de Bioetanol a partir de materia prima de segunda generación como el rastrojo de maíz puede llegar a tener un costo mucho menor en comparación a los de primera (maíz, caña de azúcar, etc.), debido a que el costo estará más asociado a la producción del maíz como tal que a la de sus residuos, pudiendo aprovechar el maíz como alimento y el residuo como generador.

El uso de mezclas bioetanol-diésel no se encuentran en gran avance debido a que es necesario el uso de aditivos para ser eficiente el combustible. Por lo tanto, las mejores mezclas de este combustible se presentan con la gasolina, a las diferentes concentraciones.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Parra,S., 2016)."Impacto de los Biocombustibles y desarrollo de las energías alternativas en Colombia." .
- [2] Masiero,G. and H. Lopes, 2008)."Etanol e biodiesel como recursos energéticos alternativos: perspectivas da América Latina e da Ásia." *Revista Brasileira De Política Internacional*.
- [3] Banco Interamericano De Desarrollo, 2015)."Integración de las energías renovables no convencionales en Colombia." .
- [4] Herguedas Ana *et al*, "BIOMASA, BIOCMBUSTIBLES Y SOSTENIBILIDAD," 2012.
- [5] Alonso-Gómez,L. A. and L. A. Bello-Pérez, 2018)."Materias primas usadas para la producción de etanol de cuatro generaciones: retos y oportunidades." *Agrociencia*.
- [6] A. Delmar *et al*, "Biocombustibles en Colombia," 2009.
- [7] M. A. Torroba, "Atlas de los biocombustibles líquidos 2019-2020," 2020.
- [8] H. Escalante *et al*, *Atlas Del Potencial Energético De La Biomasa Residual En Colombia*. UPME, 2011.
- [9] A. Abril and E. A. Navarro, *Etanol a Partir De Biomasa Lignocelulósica*. 2012.
- [10] Grande Carlos, "VALORACION BIOTECNOLÓGICA DE RESIUDOS AGRICOLAS," 2016.
- [11] F. S. Nogués, *Energía De La Biomasa (Volumen I)*. 2010. 173.
- [12] Fernández,J., 2003)."Energía de la biomasa." *Energías Renovables Para El Desarrollo.Thomson-Paraninfo*.
- [13] Rubin,E. M., 2008)."Genomics of cellulosic biofuels." *Nature*.
- [14] Franco,A. G., P. N. M. Yépes and H. A. V. Sánchez, 2009)."Pretratamientos de

la celulosa y biomasa para la sacarificación." *Scientia Et Technica*.

[15] Prinsen,P., 2010)."Composición química de diversos materiales lignocelulósicos de interés industrial y análisis estructural de sus ligninas." .

[16] Erick,R., 2014)."DETERMINACIÓN DE LOS PRINCIPALES COMPONENTES DE LA BIOMASA LIGNOCELULOSICA; CELULOSA, HEMICELULOSA Y LIGNINA DE LA PAJA DE TRIGO PARA SU POSTERIOR PRETRATAMIENTO BIOLÓGICO."

[17] Amaris,J. M., D. A. Manrique and J. E. Jaramillo, 2015)."Biocombustibles líquidos en Colombia y su impacto en motores de combustión interna. Una revisión." *Fuentes, El Reventón Energético*.

[18] Cortínez Villalobos,V. A., 2010)."Comparación de pretratamientos en residuos forestales para la producción de bioetanol de segunda generación: hidrólisis ácida y líquidos iónicos." .

[19] Alejos,C. and E. Calvo, 2015)."Biocombustibles de primera generación." *Revista Peruana De Química E Ingeniería Química*.

[20] Jambo,S. A. et al, 2016)."A review on third generation bioethanol feedstock." *Renewable and Sustainable Energy Reviews*.Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032116303926>. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.07.064>.

[21] Cardona,C. A. et al, 2005)."Simulación de los procesos de obtención de etanol a partir de caña de azúcar y maíz." *Scientia Et Technica*.

[22] J. Lamoureux, "Diseño Conceptual de una Planta de Biodiesel," 2017.

[23] S. I. Merano Urtado, "Evaluación Ambiental e Integración Energética de una planta de producción de bioetanol a partir de residuos de arroz," 2016.

[24] Ríos Ignacio, "Estudio De la Formulación etanol-diesel," 2013.

[25] Advanced Hardwood Biofuels Northwest, "Etanol ahora y en el futuro," 2017.

- [26] S. Alvarez, P. Evelson and A. Boveris, "Etanol El combustible del Futuro," 2008.
- [27] D. Alonso, "EVOLUCIÓN DEL BIOETANOL EN COLOMBIA," 2017.
- [28] J. Bendeck and O. -. Fedebiocombustibles, "Boletin165," 2017.
- [29] UPME, "Boletín Estadístico de Minas y Energía 2016 - 2020," (29), 2021.
- [30] Kim,S. and B. E. Dale, 2004). "Global potential bioethanol production from wasted crops and crop residues." *Biomass Bioenergy*. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0961953403001375>. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2003.08.002>.
- [31] CIAT and CIMMYT, "Maiz para Colombia," 2019.
- [32] C. A. Quintero *et al*, "ESTIMACIÓN DEL POTENCIAL ENERGÉTICO A PARTIR DE LA BIOMASA PRIMARIA AGRÍCOLA EN EL DEPARTAMENTO DE CUNDINAMARCA," 2017.
- [33] S. Pineda Hoyos *et al*, "Plan de competitividad de Sabana Occidente," *Centro De Pensamiento En Estrategias Competitivas - Cepec*, Marzo, 2011.
- [34] Andres Cardenas Mondragon, "CCI inició nueva encuesta nacional agropecuaria (ENA)," *Portafolio*, 2009. Available: <https://search.proquest.com/docview/334439211>.
- [35] Gobernación Cundimarca, Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural, "Evaluaciones agropecuarias del departamento de cundinamarca estadísticas de cultivos año 2020," .
- [36] Cardona,C. *et al*, 2005. "Producción de etanol carburante: material lignocelulósico una nueva alternativa," Universidad Del Valle, vol. II, pp. 47-55, .
- [37] P. Curto *et al*, "Cuantificación y evaluación del potencial energético de residuos agrarios y agroindustriales no tradicionales," Noviembre, 2017.
- [38] Saidur,R. *et al*, 2011). "A review on biomass as a fuel for boilers." *Renewable and Sustainable Energy Reviews*.

[39] Acevedo,A. and G. A. Cruzate, (2018)."Residuos de cosecha con fines bioenergéticos: el rastrojo de maíz." .

[40] Alejandro,D., .2010."Estudio Exploratorio Para La Producción De Bioetanol Y Co-Productos De Biorefinería, A Partir De Rastrojos De Maíz." .

[41] X. P. Cervantes Molina, "Biomasa residual del cultivo de maíz duro y su potencial energético en el cantón Mocache, año 2014.Plan de disminución de quema de residuos agrícolas," 2015.

[42] Gómez,R. D. *et al*, (2019)."Evaluación Sinérgica de la Gasificación de Biomasa Residual en Mezclas de Maíz y Algodón." *Información Tecnológica*.

[43] Wang,L., A. Shahbazi and M. A. Hanna, (2011)."Characterization of corn stover, distiller grains and cattle manure for thermochemical conversion." *Biomass Bioenergy*.

[44] Sun,Y. and J. Cheng, (2002)."Hydrolysis of lignocellulosic materials for ethanol production: a review." *Bioresour. Technol*. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960852401002127>. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0960-8524\(01\)00212-7](https://doi.org/10.1016/S0960-8524(01)00212-7).

[45] Anonymous *Evaluation of Biomass-to-Ethanol Fuel Potential in California (2 Volumes, Report & Appendices, Combined)*. 1999.

[46] Velasco,A., .2020."Una Revisión General De Los Procesos Para La Producción De Bioetanol De Segunda Generación A Partir De Biomasa Lignocelulosa." .

[47] P. Moodley and C. Trois, "2 - lignocellulosic biorefineries: The path forward," in *Sustainable Biofuels*, R. C. Ray, Ed. 2021, Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780128202975000104>. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-820297-5.00010-4>.

[48] A. A. Shah *et al*, "Chapter 7 - biomass pretreatment technologies," in *Hydrocarbon Biorefinery*, S. K. Maity, K. Gayen and T. K. Bhowmick, Eds. 2022, Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780128233061000145>. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-823306-1.00014-5>.

[49] Esteghlalian, A. *et al*, 1997). "Modeling and optimization of the dilute-sulfuric-acid pretreatment of corn stover, poplar and switchgrass." *Bioresour. Technol.* Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960852497816069>. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0960-8524\(97\)81606-9](https://doi.org/10.1016/S0960-8524(97)81606-9).

[50] L. O. Ingram *et al*, *Metabolic Engineering of Bacteria for Ethanol Production*. 1998. 58(2-3). Available: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/%28SICI%291097-0290%2819980420%2958%3A2%3C204%3A%3AAID-BIT13%3E3.0.CO%3B2-C>. DOI: 10.1002/(SICI)1097-0290(19980420)58:2/33.0.CO;2-C.

[51] P. Bajpai, *Pretreatment of Lignocellulosic Biomass for Biofuel Production*. (1st ed. 2016 ed.) 2016. Available: <https://library.biblioboard.com/viewer/89657e56-c3c9-11ea-bd52-0ae0aa0d175d>. DOI: 10.1007/978-981-10-0687-6.

[52] Luo, C., D. L. Brink and H. W. Blanch, 2002). "Identification of potential fermentation inhibitors in conversion of hybrid poplar hydrolyzate to ethanol." *Biomass Bioenergy*. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0961953401000617>. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0961-9534\(01\)00061-7](https://doi.org/10.1016/S0961-9534(01)00061-7).

[53] Mithra, M. G. *et al*, 2018). "Comparison of ethanol yield from pretreated lignocellulo-starch biomass under fed-batch SHF or SSF modes." *Heliyon*. Available: <https://www-sciencedirect-com.ezproxy.uamerica.edu.co/science/article/pii/S2405844018339288>. DOI: <https://doi-org.ezproxy.uamerica.edu.co/10.1016/j.heliyon.2018.e00885>.

[54] Guigou, B., 1988). "Impressions de terrain." *Bulletin De l'Association Française Des Anthropologues*. Available: https://www.persee.fr/doc/jda_0249-7476_1988_num_31_1_1374. DOI: 10.3406/jda.1988.1374.

[55] I. Ambiental, "UNIVERSIDAD INTERNACIONAL SEK FACULTAD DE CIENCIAS AMBIENTALES CARRERA DE INGENIERÍA AMBIENTAL TESIS DE GRADO PREVIA LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO," .

[56] D. Carlo *et al*, "DISEÑO DE UNA PLANTA DE PRODUCCIÓN DE BIOETANOL,"

2018.

[57] Kadam, K. L., E. C. Rydholm and J. D. McMillan, 2004). "Development and validation of a kinetic model for enzymatic saccharification of lignocellulosic biomass." *Biotechnol. Prog.*

[58] Oh, K. *et al*, 2000). "Bioconversion of cellulose into ethanol by nonisothermal simultaneous saccharification and fermentation." *Appl. Biochem. Biotechnol.*

[59] E. A. Blanco, "BLOQUE II -CAPÍTULO 8. MOLIENDA 8.1. Molienda 8.1.1. Grados de molienda," .

[60] Anonymous "REACTORES QUÍMICOS." *Equipos Y Laboratorio De Colombia*. Available: <https://www.equiposylaboratorio.com/portal/articulo-ampliado/reactores-quimicos>.

[61] Olguin, J. Q., E. E. S. Patlán and J. S. García, 2018). "USO DE LA EXPLOSIÓN SÚBITA DE VAPOR COMO PRETRATAMIENTO PARA FRACCIONAR BIOMASA (USE OF STEAM EXPLOSION AS PRE-TREATMENT TO FRACTION BIOMASS)." *Pistas Educativas*.

[62] *Fermentación y respiración anaeróbica (artículo)*(). Available: <https://es.khanacademy.org/science/ap-biology/cellular-energetics/cellular-respiration-ap/a/fermentation-and-anaerobic-respiration>.

[63] *Continuous Filter - Rotapress FRP/HCT - 3V Tech*(). Available: <https://www.3v-tech.com/en/process-equipment/11/filters/29/continuous-filter-rotapress-frphct>.

[64] A. S. Cerquera, C. Andrés and C. Acosta, "Separation of an ethanol-water binary mixture in a UDCC plate distillation column by densitometry ," Oct, Oct.

[65] Montiel Rivas, J. L., 2017). "Diseño y simulación del proceso de obtención de etanol a partir de bagazo de caña." .

[66] R. Freudenberg, "Advance Praise for Alcohol Fuel," 2009.

[67] Rodríguez, L. A., (/01/011990). "Uso de etanol carburado en motores Diesel." *Acta*

Agron. Available:

https://revistas.unal.edu.co/index.php/acta_agronomica/article/view/15459.