

Valorización de lixiviados provenientes de residuos orgánicos usados en la producción de etanol en el departamento de Santander

Cristian David Carretero Pardo

Amauri Sierra Castañeda

Trabajo de grado para optar el título de Ingeniero Químico

Director

Hernando Guerrero Amaya

Ing. Químico

Phd.

Codirector

Mónica Lorena Niño Chávez

Ing. Química

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías Fisicoquímicas

Escuela de Ingeniería Química

Bucaramanga

2023

### **Dedicatoria**

Va dedicado a mis padres José y Gladys por brindarme tan excelente educación, por las enseñanzas recibidas y el ejemplo dado, y por ser un apoyo fundamental a lo largo de mi carrera. A mis hermanos Junior y Sergio, por estar ahí presentes ante todas las situaciones que nos hemos enfrentado, siempre en busca de salir hacia adelante.

*Cristian David Carretero Pardo*

Quiero expresar mi gratitud a Dios por permitirme cursar esta carrera y por brindarme el valioso regalo de la vida. Además, quiero agradecer a mis padres, Carmen Emilia Castañeda y Emiro Sierra, por su apoyo incondicional y por ser mi roca en los momentos más difíciles. Su dedicación y comprensión en cada semestre de mi formación académica han sido inestimables. También deseo agradecer a mi hermano Herminson Leandro Sierra por estar siempre a mi lado y ofrecerme su apoyo incansablemente.

*Amauri Sierra Castañeda*

### **Agradecimientos**

Agradezco a Dios por las bendiciones brindadas, por ser un pilar fundamental en mi vida, por estar ahí presente ante cada situación y por mostrarme el camino adecuado.

A la Universidad Industrial de Santander por abrirme las puertas a una educación de alta calidad, con sentido de pertenencia y excelente trato tanto personal como académico por parte de todos sus integrantes a lo largo de toda la carrera.

A la Escuela de Ingeniería Química por permitirme conocer excelentes personas, por enseñarme lo fascinante que es la profesión y cómo su aplicación en la industria genera progreso y bienestar a todo el país y a la humanidad.

A mi director, el profesor Hernando Guerrero Amaya, por guiarme en todo momento, por estar ahí atento a realizar las correcciones adecuadas, y por su empatía y comprensión a través de las distintas dificultades atravesadas a lo largo de la investigación.

A mis familiares José, Gladys, Sergio y Junior por ese gran apoyo encaminado a cumplir este gran logro, estando juntos ante la adversidad y resurgiendo de las cenizas más fuertes y motivados.

Finalmente, muchas gracias a todas las personas que me apoyaron de forma directa o indirectamente a cumplir con tan apreciada meta para mí.

*Cristian David Carretero Pardo*

En primer lugar, deseo agradecer a la Universidad Industrial de Santander por brindarme la oportunidad de adquirir los conocimientos necesarios para llevar a cabo este proyecto, y por facilitarme el uso de sus instalaciones. Asimismo, quiero expresar mi gratitud a todas las personas que de alguna manera contribuyeron al éxito de este trabajo de grado. En particular, agradezco al profesor por desempeñarse como nuestro director, brindándonos su apoyo incondicional, perseverancia y valiosas enseñanzas que han sido fundamentales para nuestro desarrollo profesional y personal.

*Amauri Sierra Castañeda*

**Tabla de contenido**

	<b>Pág.</b>
Introducción .....	9
1. Objetivos .....	11
1.1 Objetivo general .....	11
1.2 Objetivos específicos .....	11
2. Marco conceptual .....	11
3. Estado del arte .....	13
4. Metodología .....	16
4.1 Enfoque .....	16
4.2 Alcance .....	17
4.3 Método .....	17
4.4 Fases de desarrollo .....	17
4.4.1 Fases .....	18
4.4.1.1 Fase I. Revisión documentada de fuentes de Carbono .....	19
4.4.1.2 Fase 2. Análisis y selección de alternativas factibles .....	19
4.4.1.3 Fase 3. Estimación de variables. ....	19
4.5 Técnica de recolección de información .....	19
4.6 Categorización de variables .....	20
5. Resultados .....	21
5.1 Fuentes de carbono de lixiviados orgánicos del departamento de Santander.....	21
5.2 Selección y análisis las alternativas .....	22
5.3 Estimación de variables económicas.....	25
6. Conclusiones .....	29
7. Recomendaciones.....	30
Referencias.....	31

**Lista de tablas**

	<b>Pág.</b>
<b>Tabla 1.</b> <i>Clasificación de lixiviados dependiendo de su longevidad</i> .....	12
<b>Tabla 2.</b> <i>Características fisicoquímicas típicas de un lixiviado</i> .....	12
<b>Tabla 3.</b> <i>Matriz categorial</i> .....	20
<b>Tabla 4.</b> <i>Características fisicoquímicas del lixiviado relleno sanitario el Carrasco.</i> .....	22
<b>Tabla 5.</b> <i>Alternativas para la producción de etanol</i> .....	23
<b>Tabla 6.</b> <i>Análisis químico de lixiviados agroecológico</i> .....	24
<b>Tabla 7.</b> <i>Características fisicoquímicas de los lixiviados de cacao, café y cáscara de café</i> ..	25
<b>Tabla 8.</b> <i>VARIABLES ECONÓMICAS</i> .....	26
<b>Tabla 9.</b> <i>Precio de etanol por litro aplicando la fórmula según SENER (2020).</i> .....	26
<b>Tabla 10.</b> <i>Estimaciones de costos por compostaje – Millones de pesos</i> .....	27
<b>Tabla 11.</b> <i>Estimaciones de costo por proceso de fermentación de cacao y café – Millones de pesos</i> .....	28
<b>Tabla 12.</b> <i>Estimaciones de costo por Saccharomyces cerevisiae</i> .....	28

**Lista de figuras**

	<b>Pág.</b>
<b>Figura 1.</b> <i>Fases de desarrollo</i> .....	18

## Resumen

**Título:** Valorización de lixiviados provenientes de residuos orgánicos usados en la producción de etanol en el departamento de Santander \*

**Autor:** Cristian David Carretero Pardo, Amauri Sierra Castañeda \*\*

**Palabras clave:** Valorización, residuos orgánicos, producción de etanol

**Descripción:** Este proceso investigativo es desarrollado desde la perspectiva de la Ingeniería Química, como un ejercicio con fines académicos que busca fortalecer las fuentes bibliográficas relacionadas con el objeto de estudio, el cual se enfoca en la valorización de lixiviados provenientes de residuos orgánicos usados en la producción de etanol, tomando como contexto el departamento de Santander, específicamente el relleno el Carrasco, como epicentro de mayor producción de lixiviados con una producción aproximada de 1000 toneladas por día. Es un proceso que establece una metodología bajo un enfoque cualitativo, empleando la revisión documental como técnica de recolección de datos. El alcance de este estudio es descriptivo, apoyado en el método hermenéutico para el tratamiento de la información. Por consiguiente, la finalidad de este trabajo se direcciona en la selección, análisis y determinación de las alternativas más adecuadas para la producción de etanol por medio del tratamiento de estos residuos orgánicos, en aras disminuir la contaminación ambiental, y a su vez, generar valor agregado en el mercado de los desechos orgánicos en el departamento de Santander.

---

\* Trabajo de grado

\*\* Facultad de ingenierías Físico-Químicas. Escuela de ingeniería Química. Director: Hernando Guerrero Amaya. Co-director Mónica Lorena Niño Chávez.

### Abstract

**Título:** Valorization of leachates from organic waste used in the production of ethanol in the department of Santander<sup>†</sup>

**Author:** Cristian David Carretero Pardo, Amauri Sierra Castañeda <sup>\*\*</sup>

**Keywords:** Leachate, Fermentation, Ethanol, Organic waste

**Description:** This investigative process is developed from the perspective of Chemical Engineering, as an exercise for academic purposes that seeks to strengthen the bibliographic sources related to the object of study, which focuses on the valorization of leachate from organic waste used in the production of ethanol, taking the department of Santander as a context, specifically the Carrasco landfill, as the epicenter of the highest leachate production with an approximate production of 1000 tons per day. It is a process that establishes a methodology under a qualitative approach, using documentary review as a data collection technique. The scope of this study is descriptive, supported by the hermeneutic method for the treatment of information. Therefore, the purpose of this work is directed towards the selection, analysis and determination of the most suitable alternatives for the production of ethanol through the treatment of this organic waste, in order to reduce environmental pollution, and in turn, generate added value. in the organic waste market in the department of Santander.

---

<sup>†</sup> Degree work

<sup>\*\*</sup> Physicochemical Engineering Faculty. School of Chemical Engineering. Director: Hemando Guerrero Amaya. Co-director: Mónica Lorena Niño Chávez.

## Introducción

A nivel internacional, cerca de 1,4 billones de toneladas de residuos sólidos fueron dispuestos en vertederos municipales en el último año, los cuales representan un 70% de los residuos sólidos en el mundo. (Ma, y otros, 2022)

En el caso de Colombia se generan alrededor de 32.000 toneladas de residuos sólidos municipales diariamente, cuya forma de tratamiento actualmente son los rellenos sanitarios. Esta una de las técnicas más utilizadas para el tratamiento de residuos en el país, en el 2016 cerca de 11 millones de toneladas de estos desechos fueron dispuestos en vertederos. Estos despojos poseen una composición alta en materia orgánica, la cual puede ser valorizada a través del compostaje o la producción de biogás. (Machado & Hettiarachchi, 2020)

Con base al postulado anterior, cabe resaltar que los vertederos sin el tratamiento adecuado generan fuertes olores y grandes cantidades de lixiviados que contaminan seriamente el medio ambiente, debido a que tienen altas concentraciones de nitrógeno (Renou, Givauda, Poulain, Dirassouyan, & Moulin, 2008), si no se gestionan de manera eficiente se convertirán en una fuente subyacente de contaminación de las aguas superficiales y subterráneas, debido al alto riesgo de infiltración de lixiviados en la tierra y los acuíferos. El lixiviado generado se considera una grave amenaza ambiental para la salud pública, debido a la naturaleza tóxica y recalcitrante de sus componentes. Por lo tanto, debe recogerse y tratarse adecuadamente antes de ser vertido en el medio ambiente. (Jagaba, y otros, 2021)

Considerando la región del área metropolitana de Bucaramanga en el departamento de Santander, podemos constatar que esta zona también se enfrenta a problemas en cuanto a la disposición de residuos sólidos (Niño Carvajal, Ramón Valencia, & Ramón Valencia, 2016). En el área urbana, la gestión de residuos sólidos ha seguido un patrón similar al observado a nivel mundial y nacional, donde se han implementado estrategias que, debido a la falta de continuidad en los proyectos, no han sido viables y han agravado la problemática. De acuerdo con Niño Carvajal, y Ramón Valencia (2016), se han llevado a cabo monitoreos en la planta de

tratamiento de lixiviados de El Carrasco, los cuales indican un caudal promedio anual de 2,1 litros por segundo, lo que equivale a aproximadamente 5.443,2 metros cúbicos mensuales.

En relación a lo expuesto anteriormente, se estableció la siguiente pregunta para el desarrollo de esta investigación: ¿qué tratamientos viables se pueden aplicar a los lixiviados provenientes de residuos orgánicos para la producción de etanol, que valoricen su uso en el mercado?

## **1. Objetivos**

### **1.1 Objetivo general**

Realizar una revisión del estado del arte sobre las alternativas existentes en la producción de etanol mediante la aplicación de procesos fermentativos a lixiviados provenientes de residuos orgánicos en el departamento de Santander.

### **1.2 Objetivos específicos**

Determinar las fuentes de carbono provenientes de lixiviados orgánicos del departamento de Santander que propendan por maximizar los procesos fermentativos.

Seleccionar las alternativas más viables en la producción de etanol usando lixiviados orgánicos.

Estimar las variables económicas asociadas a las alternativas más viables en la producción de etanol a partir de lixiviados orgánicos.

## **2. Marco conceptual**

La fundamentación teórico – conceptual de este proceso investigativo se cimentó en la terminología relacionada directamente con el objeto de estudio; desarrollo conceptual en el marco de los lixiviados y el etanol.

Según Paséux (2000), se denominan lixiviados a los líquidos que circulan a través de los residuos en los vertederos. Estos líquidos se originan cuando el agua de la lluvia se filtra por los residuos en proceso de descomposición y la materia orgánica, ocasionando la lixiviación. Los lixiviados pueden incluir materiales biológicos y compuestos químicos que resultan perjudiciales tanto para la salud humana como para el medio ambiente. Por lo tanto, es imprescindible tratarlos adecuadamente para prevenir su efecto negativo en el suelo y en el agua.

En los lixiviados se han identificado más de 200 compuestos orgánicos distintos, que se pueden clasificar en diferentes grupos, como hidrocarburos cíclicos, ácidos y ésteres, fenoles, lantánidos y furanos, compuestos que contienen nitrógeno, fósforo, sulfuro y sílice, y trazas identificables. Estos compuestos incluyen sustancias químicas altamente contaminantes, como el tolueno, el etilbenceno, el xileno, el estireno, el naftaleno y el pireno. (Paséux, 2000)

**Tabla 1.**

*Clasificación de lixiviados dependiendo de su longevidad*

	Jóvenes	Intermedios	Viejos
Edad (años)	Menor a 1	1-5	Mayor a 5
pH	Menor a 6,5	6,5-7,5	Mayor a 7,5
DQO (g/L)	Mayor a 15	3-15	Menor a 3
DBO/DQO	0,5-1	0,1-0,5	Menor a 0,1
TOC/DQO	Menor a 0,3	0,3-0,5	Mayor a 0,5
NH <sub>3</sub> -N (mg/L)	Menor a 400	400	Mayor a 400
Metales pesados (mg/L)	Mayor a 2	Menor a 2	Menor a 2
Compuestos orgánicos	80%AGV	5-30% AGV+AH+AF	AH+AF
Tipo	S/D	P	E

*Nota.* Renout et al, 2008

VFA= ácidos Grasos Volátiles; AH= Ácidos Húmicos; AF= ácidos Fúlvicos; SD= Sin Degradar; P= Parcialmente degradados o estabilizados; E= Estabilizados.

**Tabla 2.**

*Características fisicoquímicas típicas de un lixiviado*

Edad del relleno	Nuevo (<2 años)	Intermedio (>2años)	Viejo (>10 años)
Constituyentes (mg/l)	<b>Rango</b>	<b>Valor típico</b>	<b>Rango típico</b>
ALCALINIDAD CaCO <sub>3</sub>	1000-10000	3000	200-1000
DQO	3000-60000	18000	100-500
DBO	2000-30000	10000	100-200
SST	200-2500	500	100-400
COT	1500-20000	6000	80-160
pH	5 - 8	6	6,6-7,5
Nitrógeno total	20-1500	400	100-200
Fósforo total	5-100	30	6,6 - 7,5

*Nota.* Henry, J. G., Heinke, G. W., & Burton, I. (1996). Environmental science and engineering (Vol. 445, No. 452, pp. 456-457). Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall.

El etanol es un compuesto orgánico alifático que contiene un grupo hidroxilo y se encuentra dentro de la familia de los alcoholes. Su fórmula empírica es  $C_2H_6O$ , y su fórmula química semidesarrollada es  $CH_3-CH_2-OH$ , con un peso molecular de 46,0684. A temperatura y presión normales, se presenta como un líquido incoloro con un olor etéreo fuerte y penetrante que se asemeja al del ácido acético, aunque no es desagradable al olfato. Es altamente inflamable y tiene una temperatura de ebullición de 78,4 °C. El etanol puede disolverse completamente en agua, sin importar la proporción en la que se encuentre, y cuando su concentración es del 96% en peso, se forma una mezcla azeotrópica.

La fermentación es un proceso metabólico que ocurre en ausencia de oxígeno y que se utiliza para generar energía y moléculas orgánicas. Aunque es menos eficiente que la respiración aerobia, ha sido aprovechada por los seres humanos desde tiempos remotos para producir alimentos y bebidas.

Durante la fermentación, se descomponen carbohidratos y otras moléculas orgánicas para obtener energía y se producen otras moléculas orgánicas. Existe una gran variedad de organismos capaces de llevar a cabo este proceso, pero generalmente se trata de comunidades de microorganismos que pueden sobrevivir en ambientes con poco oxígeno, como el tracto digestivo de los animales, los sedimentos del fondo marino y los productos fermentados en ambientes artificiales. (Fernández, 2023)

### **3. Estado del arte**

Un dato fundamental para el estudio del tratamiento de lixiviados en un relleno sanitario es la evaluación del caudal medio generado, un trabajo realizado por Bejarano, Gutiérrez y Pérez (2020) logró determinar mediante el modelo suizo de estimación, un caudal de lixiviado generado de 269.758 metros cúbicos por mes en el vertedero municipal de Viñales, Cuba. (Bejarano, Gutiérrez, & Pérez, 2020)

Un estudio realizado por Prato García (2007) en la Universidad Iberoamericana de la Ciudad de México investigó el uso de procesos avanzados de oxidación (PAOs) en la remediación de un efluente real proveniente de un relleno sanitario ubicado en Temixco, Morelos. Dicha investigación busca la reducción de la toxicidad de un lixiviado maduro. A partir de las condiciones experimentales se garantizó una buena remoción global de la demanda química de oxígeno (DQO) en la muestra de lixiviado debido principalmente a la precipitación del material húmico presente en la solución. (Prato García, 2007) En Popayán, Colombia una investigación de tipo cuantitativa-experimental realizada por Arias, Burbano, Bustamante y Lozada (2018) arrojó resultados satisfactorios en la producción de etanol proveniente de la fermentación aeróbica del lixiviado generado por residuos orgánicos en diferentes plazas de mercado de la ciudad. Esta nueva opción de biocombustible se corroboró a través de pruebas químicas, en las cuales se calculó un volumen medido en Grados Lussac de 1.41% GL en 100ml de lixiviado proveniente de residuos de piña. (Arias, Burbano, Bustamante, & Lozada, 2018)

Un estudio llevado a cabo en Portugal empleando diversas tecnologías como coagulación con cloruro férrico o sulfato de aluminio, oxidación biológica y procesos de oxidación avanzada química y electroquímica, apunta a solucionar el problema del ineficiente tratamiento de los lixiviados generados por residuos sólidos en plantas industriales. Los resultados de esta investigación demuestran la viabilidad de obtener lixiviados que cumplan con los estándares ambientales europeos y que puedan ser descargados en los sistemas hídricos. (Segundo et al., 2021)

Internacionalmente, la cantidad de residuos orgánicos generados en Corea se aproxima a unas 13000 toneladas, representando el 27% de sus desechos municipales, de los cuales 70-90% se transforman en lixiviados. (Ngoc & Schnitzer, 2009)

Con el propósito de producir etanol utilizando estos lixiviados, se toman del instituto de biociencia y biotecnología de Dajeon, Corea cepas de *Saccharomyces Cerevisiae* (KCTC-

7904) para realizar experimentos de fermentación en reactores Batch. (Le Man, Rene, Behera, & Park, 2011)

Con estos reactores se realiza un estudio por la Universidad de Ulsan por parte de Le Man, Rene, Behera, y Park, (2011) en el cual se desarrolla un modelo polinómico de segundo orden para evaluar los valores cuantitativos que generen la mayor eficiencia de etanol producido. Dados los resultados experimentales se logra determinar que las condiciones óptimas de funcionamiento para obtener una concentración máxima de etanol de 24.17g/L se dan a una temperatura de 38 °C, un pH 5.45 y una concentración de azúcares reductores de 75g/L. (p. 59)

En la Universidad Politécnica de Chiapas, México se hizo un estudio con pulpa de mangos que se dañan fácilmente por golpes durante la cosecha, produciendo residuos agroindustriales con alto contenido de azúcares fermentables. En ese estudio se centraron en la evaluación de producción de bioetanol a partir de Ataulfo residual (*Mangifera indica* L.) o pulpa de mango, aplicando métodos de deshidratación de la pulpa y fermentación por vermicompostaje. Se obtiene una concentración mínima para el tratamiento al 20% determinado por HPLC de  $34.54 \pm 2.2$  g/L, y máxima de bioetanol de  $44.67 \pm 1.6$  g/L alcanzados en el tratamiento con un 50% de lixiviados del vermicompostaje. Este resultado representa una opción viable para el uso de residuos orgánicos y lixiviados de vermicompostaje como una alternativa renovable para la producción de bioetanol. (Aleman Ramirez, y otros, 2020)

La investigación llevada a cabo por (C. Balladares et al., 2016) en su tesis doctoral muestra que es posible transformar la biomasa de lixiviados en alcoholes a través del uso combinado de procesos físicos, químicos y biológicos, en conjunto con la utilización de bacterias naturales o modificadas. El proceso de fermentación permite que los azúcares presentes en los lixiviados sean descompuestos y transformados en alcoholes. Este hallazgo

representa una alternativa prometedora para el aprovechamiento de los residuos y la producción de sustancias útiles. (Balladares, 2016)

Según Balladares (2016), quien ha realizado un estudio sobre los lixiviados de café y cacao en la costa ecuatoriana, se ha determinado que, si se logra una eficiencia del 60% durante la fermentación, los azúcares presentes en estos lixiviados podrían generar una producción anual de hasta 1'261.450 galones de etanol hidratado. Es de esperar que el gobierno ecuatoriano utilice este etanol hidratado mezclado con naftas importadas para la producción de biocombustibles. Este hallazgo tiene una gran relevancia, ya que podría ayudar a reducir la dependencia del país en cuanto a la importación de combustibles fósiles y, por tanto, disminuir las emisiones de gases de efecto invernadero.

El aporte fundamental de este trabajo de grado en la resolución de la problemática actual en el tratamiento de lixiviados provenientes de residuos orgánicos para producir etanol, consiste en expandir la generación de conocimiento respecto al tratamiento de éstos lixiviados, de comunicar sobre los diferentes métodos funcionales para su aplicación en la industria y de incentivar al correcto uso de éstos lixiviados por medio de alternativas viables.

## **4. Metodología**

### **4.1 Enfoque**

El modelo metodológico de este estudio se estructuró con base a los postulados de Hernández Sampieri en sus publicaciones de metodología de investigación. (Hernández Sampieri, Fernández Collado, & Baptista, 2017)

El proceso de interpretación de datos se realizó bajo la técnica de revisión documentada. Por consiguiente, la naturaleza de los datos recolectados establece una investigación de enfoque cualitativo; en este tipo de investigación “la acción indagatoria se mueve de manera dinámica en ambos sentidos: entre los hechos y su interpretación, y resulta un proceso más bien “circular”

en el que la secuencia no siempre es la misma, pues varía con cada estudio”. (Hernández Sampieri, Fernández Collado, & Baptista, 2017, pág. 40)

#### **4.2 Alcance**

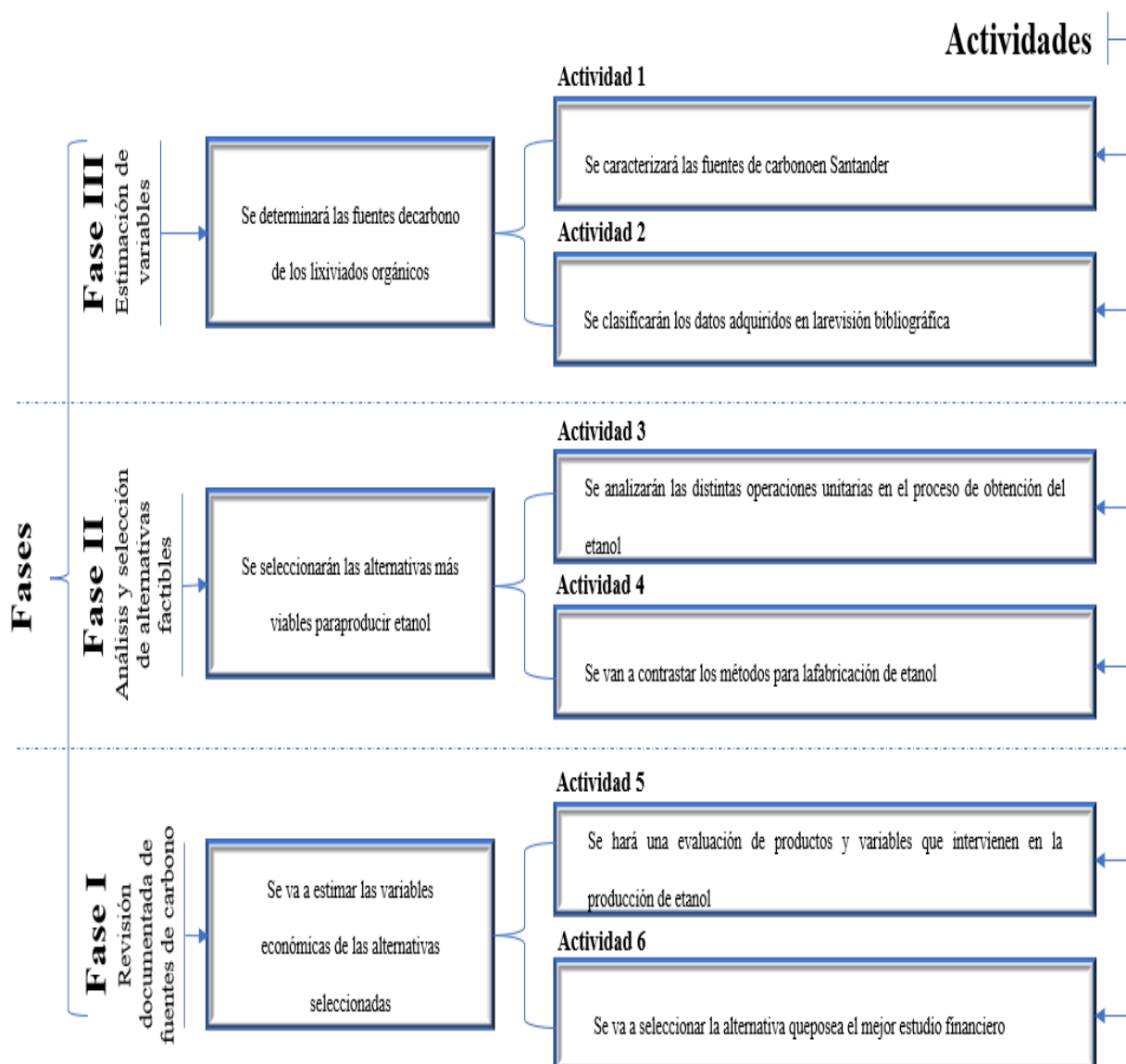
El alcance de este proceso investigativo es de tipo descriptivo, puesto que los hallazgos de la misma buscan la descripción de los fenómenos problematizadores dentro del objeto de estudio.

#### **4.3 Método**

El tratamiento de la información recolectada se desarrolló mediante el método hermenéutico, el cual permitió la interpretación de los datos recolectados mediante la revisión documentada. Según Hernández Sampieri, Fernández Collado y Baptista (2017), el proceso hermenéutico se concentra en la interpretación de la experiencia y los textos; ejercicio llevado a cabo en este estudio a partir de la revisión documentada. (p. 494)

#### **4.4 Fases de desarrollo**

Las fases de este estudio están planteadas para el alcance de cada objetivo específico de la investigación; es decir, una (1) fase de desarrollo para cada objetivo específico, para un total de tres (3) fases.

**Figura 1.***Fases de desarrollo*

#### 4.4.1 Fases

En el desarrollo de estas fases se procedió a comparar, seleccionar, organizar y evaluar la información proveniente de las distintas fuentes bibliográficas que correspondan a cada una de las etapas a realizar. Para el desarrollo satisfactorio del objetivo general propuesto, se realizarán tres etapas con dos actividades en cada una de ellas.

**4.4.1.1 Fase I. Revisión documentada de fuentes de Carbono.** En base al primer objetivo específico, se determinó las fuentes de carbono provenientes de lixiviados orgánicos del departamento de Santander que propendan por maximizar los procesos fermentativos.

- **Actividad 1)** Se revisó bibliográficamente si en el departamento de Santander, se han caracterizado o no, las fuentes de carbono fundamentales para la fermentación de residuos orgánicos por lixiviación, especificando sus propiedades morfológicas y funcionales.
- **Actividad 2)** Se clasificaron los datos obtenidos de la revisión bibliográfica sobre los avances científicos de las fuentes de carbono. Se resaltarán aquellas que posean un mayor potencial en la producción de etanol.

**4.4.1.2 Fase 2. Análisis y selección de alternativas factibles.** En la siguiente etapa el objetivo específico se seleccionó las alternativas más viables en la producción de etanol usando lixiviados orgánicos.

- **Actividad 3)** Se analizaron las distintas operaciones unitarias en el proceso de obtención del etanol. Esto incluye las fases de pretratamiento físico-químico, la fase fermentativa, las condiciones de operación y las propiedades fisicoquímicas que se deben monitorear.
- **Actividad 4)** Se compararon los diferentes métodos de fermentación de lixiviados de residuos orgánicos con la ayuda de diagramas de flujo apoyados en las referencias bibliográficas. Se va a destacar las ventajas y desventajas de cada método con el propósito de seleccionar las alternativas más viables.

#### **4.4.1.3 Fase 3. Estimación de variables.**

- **Actividad 5)** Se realizó un análisis, enfocado en un balance de los costos de las variables económicas asociadas a las alternativas más viables en la producción de etanol a partir de

lixiviados orgánicos.

- **Actividad 6)** Se organizaron las variables de menor a mayor valor, de acuerdo a sus resultados en el estudio financiero. Y se va a seleccionar la variable más valorizada para la producción de etanol por medio de lixiviados de residuos orgánicos.

#### 4.5 Técnica de recolección de información

La técnica de recolección de información de empleada en esta investigación fue la revisión documental; es una técnica de tratamiento de información cualitativa.

Para este estudio, las fuentes de información son primarias, puesto que la totalidad de los datos recolectados son de bases de información establecidas en plataformas digitales

#### 4.6 Categorización de variables

La categorización de variables de este estudio presenta las preguntas de investigación a resolver en el proceso investigativo. Así mismo, establece las categorías de análisis existentes para cada objetivo específico planteado.

**Tabla 3.**

*Matriz categorial*

Objetivo	Pregunta de investigación	Categoría	Técnica de recolección de información
Objetivo 1	¿Cuáles son las fuentes de carbono provenientes de lixiviados en el Departamento de Santander?	fuentes de carbono provenientes de lixiviados	
Objetivo 2	¿Cuáles son las alternativas para la producción de etanol empleando lixiviados orgánicos?	Alternativas para la producción de etanol empleando lixiviados orgánicos	Revisión documental
Objetivo 3	¿Cuál es la alternativa para la producción de etanol a partir de lixiviados orgánicos más rentable?	VARIABLES ECONÓMICAS	

## **5. Resultados**

En este apartado se establecen los resultados de los objetivos específicos planteados en la investigación.

### **5.1 Fuentes de carbono de lixiviados orgánicos del departamento de Santander**

Santander puede superar las 1500 T/día de residuos, dispuestos sobre todo en rellenos sanitarios regionales como: El Carrasco-B/ga 1.000 T/día; El Cucharó-Sangil 60 T/día; Relleno sanitario de Málaga 30 T/día; La Esmeralda-Barranca 180 T/día; también la gran mayoría de los municipios de la provincia de Vélez disponen en Pírgua-Tunja 30 T/día.

Escenarios de deposición de desechos sin licencia a cielo abierto en los municipios de: Betulia, Bolívar, Guaca, Los Santos, Puerto Parra, Puerto Wilches y San Andrés disponen todos aproximadamente 30 T/día; algunos municipios con rellenos sanitarios locales licenciados son: Aguada, Guacamayo, San Joaquín, San Miguel, San Vicente, Santa Helena y Cimitarra: disponiendo aproximadamente 25 T/día.

Aunque el Departamento de Santander cuenta con seis (6) rellenos bajo la jurisdicción de la CAS, esta investigación centra como fuente principal de lixiviados orgánicos el relleno El Carrasco; este se encuentra ubicado en la parte suroccidental de Bucaramanga, entre la vía Bucaramanga- Girón, donde se toma aproximadamente 900 toneladas al día de residuos sólidos provenientes de los municipios de Bucaramanga, Floridablanca, Girón, Piedecuesta, Lebrija, Rionegro, El Playón, Charta, Matanza, Zapatoca y Suratá.

**Tabla 4.***Características fisicoquímicas del lixiviado relleno sanitario el Carrasco.*

Variables	Parámetro		Unidades	Método
	Afluente	Efluente		
Ph	7,49	8,20	Unidades de pH	SM 4500 H <sup>+</sup> -B
Temperatura	33,08	29	°C	SM 2550-B
DQO	24784	4274	mg O <sub>2</sub> /l	SM 5220-C
DBO <sub>5</sub>	9983	2238	mg O <sub>2</sub> /l	SM 5210-B
Sólidos sedimentables	26,4	0,50	ml/l	SM 5540-F
Sólidos Suspendidos Totales	348	136	mg/l	SM 2540-D
Caudal	1,426	0,527	m <sup>3</sup> /l	Volumétrico
Oxígeno disuelto	0,14	0,10	mg/l O <sub>2</sub>	SM4500-O-C

*Nota:* Reporte de resultados de ensayo, laboratorio de análisis químico de aguas residuales

Los resultados obtenidos muestran que la planta de tratamiento de lixiviados del Carrasco tiene un porcentaje de remoción del 82,75, mayor al exigido por la norma (artículo 74 del decreto 1594 de 1984; los porcentajes de remoción de DQO, DBO y SST deben ser mayores a 80%). Respecto al DBO y los SST, el porcentaje de remoción cuantificado fue de 77,58 y 60,91 respectivamente, incumpliendo con la norma.

Para los parámetros pH y temperatura, se evidencia que los valores obtenidos durante la jornada del monitoreo dan cumplimiento a lo establecido en la norma; debido a que se presentaron valores de pH entre 7,49 y 8,20 unidades de pH. En cuanto a la temperatura, el valor máximo registrado en el efluente fue de 29 °C valor inferior a 40 °C requerido.

Aunque se puede proyectar un promedio de 7 epicentros como fuentes de carbono por lixiviados por residuos orgánicos para la producción potencial de etanol, la producción diaria de El Carrasco presenta una capacidad aproximada del 66,33% de la producción total de residuos recibidos diarios del departamento de Santander.

## 5.2 Selección y análisis las alternativas

En este apartado se establecen las alternativas para la producción de etanol a partir de lixiviados orgánicos.

Las alternativas seleccionadas fueron tres (3) con base a la revisión documental realizada en la investigación. Las alternativas seleccionadas se presentan a continuación en la tabla cinco.

**Tabla 5.***Alternativas para la producción de etanol*

No. De alternativa	Alternativa	Características de la alternativa	Posibles resultados obtenidos
1	Proceso por compostaje de residuos orgánicos	<p>La técnica de compostaje es un proceso biológico que se emplea para la transformación de residuos orgánicos en un abono de alta calidad, mediante la creación de condiciones óptimas que favorecen la actividad de los microorganismos descomponedores.</p> <p>La producción de lixiviado agroecológico representa una opción que busca reducir el impacto ambiental en diversos ámbitos, como la atmósfera, el suelo y las fuentes de agua, a través de la captación y uso de los lixiviados generados en el proceso de compostaje.</p>	<p>El lixiviado agroecológico presenta una composición química más baja en comparación con el lixiviado convencional, esto se debe a que se obtiene de la aplicación de residuos vegetales en el compostaje, que provienen de cultivos donde se utilizan principalmente elementos como el potasio y el calcio para el desarrollo y crecimiento de las plantas.</p>
2	Alternativa aplicando proceso fermentativo de cacao y café	<p>En el caso específico de la obtención de lixiviados a partir de la corteza del cacao, se llevó a cabo una técnica que implicó la apertura de la mazorca con un corte transversal y la posterior extracción de las semillas. Estas semillas se colocaron en un saco de polipropileno para simular las condiciones de almacenamiento y fermentación y de este modo obtener los lixiviados correspondientes.</p> <p>En el laboratorio, se llevó a cabo la separación de las semillas y la cáscara de los frutos frescos de café, también conocidos como "concha". Las semillas despulpadas fueron maceradas con agua destilada en una proporción de 1:1 p/p durante una hora para eliminar el exceso de mesocarpio en la semilla, una práctica comúnmente realizada por los agricultores en el primer lavado. Se realizaron dos lavados adicionales en las mismas proporciones antes de proceder con el secado.</p> <p>Simultáneamente, se procedió a macerar el pericarpio en una agitadora orbital a una velocidad constante de 90 revoluciones por minuto con agua destilada en una proporción de 1:5 peso a peso, hasta lograr una concentración constante de grados Brix.</p>	<p>Utilizando la relación entre el peso del lixiviado y el peso del cacao seco, se ha elaborado la gráfica 4.5. para extrapolar la cantidad de lixiviado producido por tonelada métrica de cacao final, que es la unidad de medida utilizada en el comercio internacional. Los resultados muestran que alrededor de 590 kilogramos de lixiviado se quedan en el campo por cada tonelada métrica de cacao seco.</p> <p>Se puede afirmar que los lixiviados de café y cacao tienen un pH adecuado para promover el crecimiento de microorganismos que puedan descomponer los azúcares y producir bioetanol como resultado.</p>
3	<i>Saccharomyces cerevisiae</i>	<p>Se emplea levadura en ciernes en los compuestos orgánicos a través de lotes controlados.</p> <p>Se basa en la esterilización a 120°C, durante 15 minutos del lixiviado proveniente de residuos orgánicos, seguida del ajuste del pH y la reducción de azúcar concentrada. Posteriormente se realiza el proceso de fermentación y obtención de etanol.</p>	<p>Se puede lograr un rendimiento máximo de 0,31 g de etanol g<sup>-1</sup>(-1) RSC correspondiente a una concentración de etanol de 23,56 g.</p> <p>Se puede aumentar la escala y producir etanol de valor agregado, mediante la esterilización de lixiviado de residuos orgánicos antes de la fermentación</p>

El lixiviado agroecológico con relación al convencional presenta índices más bajos de contaminación ya que posee una mayor contribución vegetal en su composición orgánica.

(Ver tabla 6)

**Tabla 6.**

*Análisis químico de lixiviados agroecológico*

<b>Parámetro</b>	<b>Lixiviado Agroecológico</b>	<b>Unidades</b>
Carbono Orgánico oxidable	2,66	g/L
ph	7,67	dS/m
Conductividad eléctrica	0,04	g/L
Nitrógeno orgánico (NOrg)	0,53	g/L
Fósforo soluble (P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> )	0,17	g/L
Potasio soluble (K <sub>2</sub> O)	3,29	g/L
Calcio soluble (CaO)	0,42	g/L
Magnesio soluble (MgO)	0,22	g/L
Azufre soluble (SSO <sub>4</sub> )	0,02	g/L
Hierro soluble	0,06	ppm
Manganeso soluble	0,9	ppm
Cobre soluble	3,8	ppm
Zinc soluble	1,9	ppm
Boro soluble	1,1	ppm
Sodio soluble	0,16	g/L

Después de realizar un análisis de los niveles de lixiviado convencional, y teniendo en cuenta un ejemplo práctico de dilución, se ha llegado a la conclusión de que un valor de 0,17 dS/m no causa ningún daño al suelo, por lo que su aplicación no representa una amenaza de salinización. Sin embargo, es esencial tener precaución al aplicarlo con frecuencia, ya que esto puede dar lugar a una considerable acumulación de sales en el suelo. Esto puede resultar en una disminución de la disponibilidad de agua para las plantas, ya que los complejos salinos adicionales en el suelo retienen el agua. Es importante recordar que la aplicación de lixiviados puede tener un efecto negativo en el suelo a largo plazo si no se realiza de manera adecuada.

**Tabla 7.***Características fisicoquímicas de los lixiviados de cacao, café y cáscara de café*

Parámetro (Unidad)	Cacao	Café	Cáscara de café
Densidad (g/ml)	1,10	1,10	1,03
	0,01	0,01	0,01
°Brix	19,60	4,2	3,25
	0,57	0,8	0,25
pH	3,58	3,83	4,05
	0,07	0,09	0,05
Sólidos suspendidos totales (mg/l)	9711,00	2598,00	867,50
	685,89	483,66	114,50
Sólidos totales (mg/l)	192154,00	23605,00	11813,50
	6683,57	8379,22	1171,50
Conductividad (mS/cm)	3,29	3,39	4,29
	0,06	0,32	0,97
Salinidad (ppt)	1,71	1,79	2,26
	0,03	0,20	0,53
Resistividad ( $\Omega$ -cm)	3,04 <sup>E+2</sup>	2,97 <sup>E+2</sup>	2,46 <sup>E+2</sup>
	0,02	0,01	0,02
Tensión superficial (N)	52,65	54,68	53,75
	1,91	1,39	0,65

La importancia del valor del pH obtenido radica en su influencia en el crecimiento celular y la producción de metabolitos secundarios, tal como lo señaló Buzas (1988). De acuerdo con los estudios llevados a cabo por Buzas en 1988, los valores de pH comprendidos entre 3,5 y 5,0 son los más idóneos para el desarrollo de las levaduras de pan. En consecuencia, los lixiviados de café y cacao presentan un pH favorable para el crecimiento de microorganismos que son capaces de descomponer los azúcares y transformarlos en bioetanol.

### 5.3 Estimación de variables económicas

Para la estimación de variables económicas se concatena la relación de factores contextuales y procesos productivos de etanol de lixiviados orgánicos. El precio de etanol producido se calculará de acuerdo a la siguiente fórmula, según SENER (2020):

$$PE = PE_{spot} * \frac{(1+CI) * FC_1 + LI}{FC_2} * TC + TC$$

**Tabla 8.***Variables económicas*

SIGLA	DEFINICIÓN
PE:	Precio del etanol en cada Terminal de Almacenamiento y Reparto, pesos por litro.
PEspot:	Promedio del precio spot (cotizaciones altas y bajas) del Etanol, publicada en Platt's Market Scan del periodo 21 del mes T-2 al 20 del mes T-1, en donde T es el mes de aplicación del precio, UScts/gal.
CI:	Costos de importación del Etanol, será el porcentaje aplicable de acuerdo a los derechos de importación establecidos por la Secretaría de Economía y aplicados por el Servicio de Administración Tributaria, %.
FC1:	Factor de conversión de UScts/gal a US\$/b, 0.42
LI:	Logística de importación, costo de logística incluyendo transporte marítimo y almacenamiento en terminal marítima. En el caso de Cadereyta será el costo de importación terrestre. Estos datos serán los reportados por compañías especializadas en la importación de productos, US\$/b.
FC2:	Factor de conversión de US/b a US/lt, 158.9873
TC:	Promedio establecido por las resoluciones del Ministerio de energía, comprendidas entre el día 21 del mes T-2 al día 20 del mes T-1, siendo T el mes de aplicación del precio, del tipo de cambio para solventar obligaciones denominadas en moneda extranjera pagaderas en la República Mexicana.
CT:	Costo de transporte terrestre desde el punto de importación hasta cada Terminal, correspondiente a lo reportado por compañías especializadas, \$/lt.

Según SENER (2020), los costos de producción por litro de etanol a partir de fuentes de carbono orgánicas llegan hasta \$8.768 pesos mexicanos equivalentes a \$2,720 pesos colombianos por litro, de los cuales son calculados considerando un rendimiento de 400 litros por tonelada de residuo orgánico, más el costo de los factores definidos en la ecuación aplicada.

**Tabla 9.***Precio de etanol por litro aplicando la fórmula según SENER (2020).*

	Fuente de Carbono Orgánica Pesos Nacional (MXN)	Porcentaje (%)
Insumo Básico	\$ 7.184	81.934
Otros Insumos	\$ 0.235	2.680
Mano de obra	\$ 0.460	5.246
Costos de producción	\$ 0.304	3.444
Gastos de operación	\$ 0.016	0.182
Amortizaciones	\$ 0.387	4.414
Otros gastos	\$ 0.184	2.099
Total	\$ 8.768	100

La estimación previa realizada por la secretaría de energía de México, demuestra lo eficiente que es el uso de fuentes de carbono para la producción de etanol en el entorno industrial de la producción de combustibles valorizando los residuos orgánicos por un costo bastante económico.

La evaluación realizada a continuación se establece sobre una proyección aproximada de 5.400 litros diarios de etanol, es decir 1.800.000 L al año (alcance establecido por la planta de etanol en Barbosa, Santander con una inversión de \$6.800 millones de pesos)

- **Recolección:** se denomina al costo estimado de la materia orgánica a recolectar para el proceso
- **Transporte:** al proceso necesario de transporte de la materia orgánica
- **Control de parámetros:** A los equipos, materiales y mano de obra requerida para el proceso
- **Proceso productivo:** Procesos de análisis fisicoquímicos, fermentación y obtención de etanol

### Tabla 10.

*Estimaciones de costos por compostaje – Millones de pesos*

Detalle	Costo estimado	Costo evaluado	Producción estimada anual
Recolección	\$400	Bajo	
Transporte	\$400	Moderado	
Control de parámetros	\$200	Moderado	<b>320.000 L</b>
Proceso productivo	\$200	Moderado	
<b>Costo total estimado</b>	<b>\$1.200</b>	<b>Moderado</b>	

La materia orgánica por compostaje no se limita a casos como el proceso de fermentación de cacao y café, o residuos de alimentos específicamente como el proceso por *Saccharomyces cerevisiae* con lixiviados de residuos orgánicos, lo cual genera una arista económica de menor valor que las mencionadas, puesto amplia el espectro de materia orgánica a procesar.

El control de parámetros incluye la indumentaria de un proceso agrícola, como palas, bolsas de polietileno, pesaje y empacado.

Esta iniciativa se puede optimizar en territorios rurales del departamento de Santander.

**Tabla 11.**

*Estimaciones de costo por proceso de fermentación de cacao y café – Millones de pesos*

Detalle	Costo estimado	Costo evaluado	Producción estimada anual
Recolección	\$400	Bajo	
Transporte	\$400	Moderado	<b>200.000 L</b>
Control de parámetros	\$200	Moderado	
Proceso productivo	\$200	Moderado	
<b>Costo total estimado</b>	<b>\$1.200</b>	<b>Moderado</b>	

Para el proceso de fermentación de cacao y café, la recolección se encuentra en la adquisición del café y el cacao (si bien, Santander produce 695.000 sacos por año de café, siendo el sexto departamento a nivel nacional y 63.416 toneladas de cacao promedia, siendo el primer departamento a nivel nacional) estos 2 productos agrícolas empleados en procesos de producción de etanol por lixiviados de los mismos, presentan también otro tipo de transformaciones para el uso humano, exponiendo el factor de recolección de mayor representatividad económica para esta alternativa. Agregado a esta situación, la capacidad de producción de etanol en el proceso de esta metodología establece que, por cada tonelada métrica de cacao seco, 590 kilogramos de lixiviados se quedan en campo.

**Tabla 12.**

*Estimaciones de costo por Saccharomyces cerevisiae*

Detalle	Costo estimado	Costo evaluado	Producción estimada anual
Recolección	\$400	Bajo	
Transporte	\$400	Moderado	<b>940.000 L</b>
Control de parámetros	\$200	Moderado	
Proceso productivo	\$200	Moderado	
<b>Costo total estimado</b>	<b>\$1.200</b>	<b>Moderado</b>	

Para el proceso de *Saccharomyces cerevisiae*, la obtención de este hongo unicelular es el valor agregado, ya que aumenta la concentración de etanol por el proceso de esterilización, esta medida en su inversión inicial de \$1.200 millones de pesos colombianos, en comparación con la planta de producción de etanol del municipio de Barbosa \$6.800, es mucho más rentable considerando que la alternativa *Saccharomyces cerevisiae*, produce el 50% aproximado de la producción proyectada por la planta del municipio de Barbosa, pero con una inversión diferencial de \$5.600 millones de pesos menos. Es decir, con la inversión realizada en la planta de Barbosa se produciría 200% bajo la metodología *Saccharomyces cerevisiae*, la cual es implementada en países como Korea, China y el medio oriente.

## 6. Conclusiones

Las conclusiones de esta investigación se presentan con base a los objetivos específicos planteados.

Revisando las fuentes de carbono provenientes de lixiviados orgánicos del departamento de Santander que propendan por maximizar los procesos fermentativos, se concluye que el relleno El Carrasco es el mayor epicentro con una producción promedio de 66,33% de la producción departamental, equivalentes a 1000 toneladas por día.

Con relación al segundo objetivo planteado en la investigación, se establecieron tres (3) alternativas de producción de etanol de lixiviados de residuos orgánicos, las cuales presentan factores diferenciales como la esterilización, el compostaje y procesos específicos para el café y cacao (productos que se obtienen en el departamento de Santander). Las características fisicoquímicas de los lixiviados producidos por estas alternativas presentan distintas variaciones, resaltando que: a) el pH del lixiviado agroecológico es de 7,67 (4 índices promedio diferencial del convencional), b) el proceso de esterilización de materia orgánica aumenta la concentración de etanol y a su vez la posibilidad de producción del mismo.

Se estableció que la alternativa *Saccharomyces cerevisiae*, es la que presenta mayor tasa de rentabilidad en cuanto a la estimación económica. Por consiguiente, los procesos de producción de materiales orgánicos se pueden potencializar en el departamento de Santander. Así mismo, la estimación de costos presento una variación en favor de esta alternativa, pues la evaluación costo – producción es mayor a las plantas convencionales, tomando como referente la planta de producción de etanol del municipio de Barbosa.

## 7. Recomendaciones

Se recomienda a la institucionalidad de responsabilidad pública o privada, la creación de una planta de producción de etanol bajo la alternativa *Saccharomyces cerevisiae*, ya que se obtendría no solo un proceso de aprovechamiento de los residuos de alimentos, sino también las posibilidades de transformación ambiental orientadas a las políticas del gobierno colombiano.

El relleno El Carrasco puede generar convenios interadministrativos en la eventualidad de la creación de una planta de para la selección de residuos de alimento para su tratamiento futuro de producción de etanol bajo la alternativa *Saccharomyces cerevisiae*.

Se recomienda la exploración del proceso de obtención de etanol por compostaje, como iniciativa de unidad productiva en las zonas rurales de Santander, con el fin de aprovechar las deposiciones no formalizadas en relleno y desarrollar procesos de transformación química en estos territorios, ya que cumplen con las características contextuales para el desarrollo de este proceso de lixiviados de residuos orgánicos.

### Referencias

- Aleman Ramirez, J., Pérez Sariñana, B., Torres Arellano, S., Saldaña Trinidad, S., Longoria, A., & Sebastian, P. (2020). Bioethanol production from Ataulfo mango supplemented with vermicompost leachate. *Catalysis Today*, 353, 173-179.
- Aponte Figueroa, G. M. (2020). Tendencias en la producción de etanol a partir de residuos orgánicos municipales mediante el análisis de la información publicada.
- Arias, A., Burbano, E., Bustamante, J., & Lozada, M. (2018). Obtención de alcoholes a partir de la fermentación del lixiviado de residuos orgánicos. *Journal de Ciencia e Ingeniería*, 10(1), 62-68.
- Balladares, C. (2016). Caracterización físico-química de los desechos agrícolas del cacao y café del litoral ecuatoriano y su potencial empleo como biocombustible. Las palmas de Gran Canaria, España. Recuperado el, 9.
- Bejerano, J., Gutiérrez, J., & Pérez, J. (2020). Estimación del caudal medio de lixiviados generados en el vertedero de Viñales, Pinar del Río. *Avances*, 22(3), 325-341.
- Cardona Alzate, C. A., Matallana Pérez, L. G., & López Suárez, F. E. (2004). Utilización industrial de desechos de frutas.
- Castaño, H. I., & Mejia, C. E. (2008). Producción de etanol a partir de almidón de yuca utilizando la estrategia de proceso sacarificación-fermentación simultáneas (SSF). *Vitae*, 15(2), 251-258.
- Cruz, P. V. (2015). Un Primer Diseño Industrial de Producción de Etanol a Partir de Paja de Sorgo.
- Espinosa, J., Hernández, T., & Yáñez, L. (2013). Descripción de la producción de etanol a partir de desechos orgánicos domésticos y hojarasca, utilizando modelos Martínez-Castillo, J., Martínez-López, A. G., Padrón-Hernández, W., Rodríguez-Bernal, O. F., Chiquito-Coyotl, O., Escarola-Rosas, M. A., ... & Tinoco-Magaña, J. C. (2014). Alternativas

- actuales del manejo de lixiviados. *Avances en química*, 9(1), 37-47. matemáticos aplicados en el software Derive 6.1 y la hoja de cálculo Excel.
- Fernández, R. A., Arredondo Fernández, R., & Desde, D. D. F. D. A. Definición de Fermentación.
- Giraldo, E. (2021). Tratamiento de lixiviados de rellenos sanitarios: avances recientes. *Revista de ingeniería*.
- Hernández Sampieri, R., Fernández Collado, C., & Baptista, P. (2017). Metodología de la Investigación. México: McGRAW-HILL / INTERAMERICANA EDITORES, S.A. DE C.V, 6a Edición.
- Huamani Tueros, F.A. (2017). Caracterización de lixiviados obtenidos a partir de los Residuos Orgánicos, en el AA. HH Santa Rosa del Sauce 2017.
- Jagaba, A., Kutty, S., Lawal, I., Abubakar, S., Hassan, I., Zubairu, I., & Noor, A. (2021). Sequencing batch reactor technology for landfill leachate treatment: A state-of-the-art review. *Journal of environmental management*, 282, 111946.
- Le Man, H., Rene, E., Behera, S., & Park, H. (2011). Main and interaction effects of process parameters on the ethanol production capacity of food-waste leachate by *Saccharomyces Cerevisiae*. *SCE Journal of Civil Engineering*, 15, 1015-1022.
- Llenque-Díaz, L. A., Díaz, A. Q., Lino, L. T., & Vega, R. S. (2020). Producción de bioetanol a partir de residuos orgánicos vegetales. *Rebiol*, 40(1), 21-29.
- Ma, S., Zhou, C., Pan, J., Yang, G., Sun, C., Liu, Y., . . . Zhao, Z. (2022). Leachate from municipal solid waste landfills in a global perspective: Characteristics, influential factors and environmental risks. *Journal of Cleaner Production*, vol. 333, p. 130234.
- Machado, C., & Hettiarachchi, H. (2020). Composting as a municipal solid waste management strategy: lessons learned from Cajicá. Colombia: Organic Waste Composting through Nexus Thinking: Practices, Policies, and Trends, 17 - 38.

- Mora Marín, J. A., & Coy Guzmán, A. Producción de etanol a partir de cascara de naranja, como fuente alternativa de energía y estrategia de negocio con una aproximación desde el proceso productivo y financiero.
- Méndez Novelo, R. I., García Reyes, R. B., Castillo Borges, E. R., & Sauri Riancho, M. R. (2010). Tratamiento de lixiviados por oxidación Fenton. *Ingeniería e investigación*, 30(1), 80-85.
- Monsalve, J. F., Medina de Pérez, V. I., & Ruiz Colorado, Á. A. (2006). Producción de etanol a partir de la cáscara de banano y de almidón de yuca. *Dyna*, 73(150), 21-27.
- Muñoz, C. F. P., Moreno, A. M., & Lizardi, M. A. PRODUCCIÓN DE BIOGÁS A PARTIR DE LA FERMENTACIÓN DE LIXIVIADOS ORGÁNICOS: EFECTO DEL pH.
- Nascimento Filho, I. D., von Mühlen, C., & Caramão, E. B. (2001). Estudo de compostos orgânicos em lixiviado de aterros sanitários por EFS e CG/EM. *Química Nova*, 24, 554-556.
- Ngoc, U., & Schnitzer, H. (2009). sustainable solutions for solid waste management in Southeast Asian countries. *Waste management*, 29(6), 1982-1995.
- Niño Carvajal, L., Ramón Valencia, J., & Ramón Valencia, J. (2016). Contaminación fisicoquímica de acuíferos por los lixiviados generados del relleno sanitario El Carrasco, de Bucaramanga. *Producción+ limpia*, 11(1), 66-74.
- Paséux, N. (2000). Organic compounds in municipal landfill leachates. *Water Science and Technology*, 42(7-8), 323-333.
- Prato García, D. (2007). Tratamiento de aguas residuales industriales fenólicas sintéticas mediante procesos avanzados de oxidación. (Master's thesis, Universidad Iberoamericana Ciudad de México. Departamento de Ingeniería y Ciencias Químicas).
- Renou, S., Givauda, n., Poulain, S., Dirassouyan, F., & Moulin. (2008). Landfill Leachate Treatment: Review and Opportunity. *Journal of Hazardous Materials*, 150, 468-493.

Santos Aguilar, J., & Zabala García, D. A. (2016). *Evaluación de la producción de Etanol a partir de residuos orgánicos y sus diferentes mezclas, generados en la Empresa de Alimentos SAS* (Bachelor's thesis, Fundación Universidad de América).

Segundo, I., Martins, R., Boaventura, R., Silva, T., Moreira, F., & Vilar, V. (2021). Finding a suitable treatment solution for a leachate from a non-hazardous industrial solid waste landfill. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 9(2), 105168.

Secretaría de Energía de México, SENER. (2020) Análisis y propuesta para la producción de etanol anhidrido en las gasolinas que comercializa PEMEX. [https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/86229/Bibliograf\\_a\\_9.pdf](https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/86229/Bibliograf_a_9.pdf)

Torres, C. A. G., & Millán, Y. P. (2015). Caracterización del lixiviado agroecológico a partir de residuos orgánicos de cultivos. *Revista de Investigación Agraria y Ambiental*, 6(2), 169-182.