

**Evaluación de factibilidad financiera del aprovechamiento energético a partir de la  
biomasa residual porcícola en el Valle del Cauca**

**Wilson Londoño Zapata**

**Trabajo de grado para optar al título de Magister en Logística y Gestión de Cadenas  
de Abastecimiento**

**Director: PhD. Diego Fernando Manotas**

**Universidad del Valle**

**Facultad de Ingeniería**

**Escuela de Ingeniería Industrial**

**Maestría en Logística y Gestión de Cadenas de Abastecimiento**

**Santiago de Cali**

**2023**

## **Agradecimientos**

Agradezco a mis compañeros de trabajo Julián Bonilla, Nelson Mina, José Benavidez, Héctor Jiménez, Daniela Quinchía y César Franco por ese apoyo incondicional durante este proceso y permitirme disponer del tiempo de asistir a las clases, también a mi compañera Yesica Lucio por su tiempo y apoyo con la presentación.

Al profesor Diego Manotas a quien admiro por su amplio bagaje académico, pero además por su forma de disfrutarse la vida, muchas gracias por sus enseñanzas y su apoyo en el desarrollo de este proyecto.

Finalmente, si algo aprendí durante este proceso es que los grandes logros son el resultado del trabajo en equipo y nada de esto hubiera sido posible en estas circunstancias sin mi compañera de vida Andrea Ospina. Gracias por tu paciencia y comprensión.

## **Dedicatorias**

Estoy plenamente convencido de que la familia es el eje principal de la vida. Por eso quiero dedicar este logro a mi esposa y mi hijo.

## Lista de Figuras

|                                                                                              |    |
|----------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Figura 1.</b> Participación de energías renovables en la generación de electricidad ..... | 14 |
| <b>Figura 2.</b> Participación de energías renovables modernas en 2009, 2019 y 2020.....     | 15 |
| <b>Figura 3.</b> Costos de inversión de otros proyectos.....                                 | 24 |
| <b>Figura 4.</b> Regresión lineal costos de inversión por cabezas de cerdos.....             | 24 |
| <b>Figura 5.</b> Costo nivelado de electricidad por tecnología 2010-2021.....                | 26 |
| <b>Figura 6.</b> Proyección del flujo de caja libre del proyecto.....                        | 27 |
| <b>Figura 7.</b> Proyección del flujo de caja libre del proyecto con venta de bioabono.....  | 28 |
| <b>Figura 8.</b> Resultado de simulación para el VPN.....                                    | 32 |
| <b>Figura 9.</b> Resultado de simulación para la TIR .....                                   | 32 |
| <b>Figura 10.</b> Resultado de simulación para el LCOE .....                                 | 33 |
| <b>Figura 11.</b> Gráfica de tornado para la variable VPN .....                              | 35 |
| <b>Figura 12.</b> Gráfica de tornado para la variable TIR.....                               | 35 |
| <b>Figura 13.</b> Gráfica de tornado para la variable LCOE.....                              | 36 |
| <b>Figura 14.</b> Porcentaje de variación explicada del modelo de simulación.....            | 37 |

## **Lista de Tablas**

|                                                                          |    |
|--------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Tabla 1.</b> Parámetros de conversión del modelo .....                | 21 |
| <b>Tabla 2.</b> Consumo de energía en granjas porcinas .....             | 22 |
| <b>Tabla 3.</b> Supuestos de entrada de simulación Monte Carlo.....      | 29 |
| <b>Tabla 4.</b> Tabla de estadísticas para las variables simuladas ..... | 34 |

## Tabla de Contenido

|                                                              |    |
|--------------------------------------------------------------|----|
| Resumen .....                                                | 7  |
| Abstract.....                                                | 8  |
| Introducción.....                                            | 9  |
| 1. Planteamiento de problema .....                           | 11 |
| 2. Objetivos .....                                           | 13 |
| 2.1. Objetivo General.....                                   | 13 |
| 2.2. Objetivos Específicos .....                             | 13 |
| 3. Revisión de Literatura .....                              | 14 |
| 3.1. Contexto Internacional.....                             | 14 |
| 3.2. Contexto Nacional .....                                 | 17 |
| 4. Desarrollo Metodológico.....                              | 20 |
| 4.1. Parámetros del Modelo .....                             | 20 |
| 4.1.1. Supuestos del Modelo.....                             | 20 |
| 4.1.2. Parámetros de Conversión de Excretas en Energía ..... | 20 |
| 4.1.3. Consumo de Energía en Granjas .....                   | 22 |
| 4.1.4. Proyección de Precio de Energía .....                 | 22 |
| 4.1.5. Ingresos del Proyecto .....                           | 23 |
| 4.1.6. Costos de Inversión del Proyecto (CAPEX).....         | 23 |
| 4.1.7. Costos de Operación del Proyecto (OPEX).....          | 25 |
| 4.1.8. Esquema de Financiación del Proyecto .....            | 25 |
| 4.2. Variables del Modelo .....                              | 26 |
| 4.2.1. Costo Nivelado de Energía (LCOE).....                 | 26 |
| 4.3. Modelo Financiero .....                                 | 27 |
| 4.3.1. Escenario con Venta de Bioabono.....                  | 28 |
| 4.4. Simulación del Modelo .....                             | 29 |
| 4.4.1. Supuestos de Entrada de Simulación Monte Carlo .....  | 29 |
| 4.4.2. Pronósticos de Salida de Simulación Monte Carlo ..... | 30 |
| 5. Análisis de Resultados .....                              | 31 |
| 5.1. Resultados de Simulación Monte Carlo.....               | 31 |
| 5.2. Análisis de Sensibilidad .....                          | 36 |
| 6. Conclusiones .....                                        | 38 |
| 7. Referencias Bibliográficas .....                          | 39 |

## **Resumen**

En este proyecto se evalúa la factibilidad financiera del aprovechamiento energético en granjas porcinas del Valle del Cauca donde el inventario promedio de cerdos es de 4100 cabezas con una distribución etaria de siete grupos. Para establecer los parámetros de conversión de residuos del proceso productivo en energía eléctrica se realiza una búsqueda y selección de parámetros a partir de fuentes secundarias. Se construye un modelo financiero de evaluación a través del flujo de caja libre usando el Valor Presente Neto VPN, la Tasa Interna de Retorno TIR y el Costo Nivelado de Energía LCOE como indicadores de desempeño del proyecto. La energía generada en el modelo de conversión permite cubrir hasta diez veces la demanda energética de la granja por lo que es viable vender el excedente al Sistema Interconectado Nacional SIN. Adicional, se evalúa el proyecto considerando la venta del subproducto del proceso como materia prima para la elaboración de bioabono. Finalmente, se analiza mediante simulación Monte Carlo el riesgo que generan algunas variables del modelo de conversión. Los resultados de la simulación permiten concluir que es factible financieramente el aprovechamiento energético en la industria porcícola del Valle del Cauca bajo las condiciones planteadas en este proyecto. Adicional, se evalúan impactos sociales y ambientales positivos que le aportan a los objetivos de desarrollo sostenible.

**Palabras Claves:** Digestión Anaeróbica (DA), economía circular, energía renovable, biogás, biomasa porcina.

## **Abstract**

This project evaluates the financial feasibility of energy use in pig farms in Valle del Cauca where the average inventory of pigs is 4100 heads with an age distribution of seven groups. To establish the parameters for the conversion of waste from the production process into electrical energy, a search and selection of parameters is carried out from secondary sources. A financial evaluation model is built through free cash flow using the Net Present Value NPV, the Internal Rate of Return IRR and the Levelized Cost of Energy LCOE as project performance indicators. The energy generated in the conversion model allows covering up ten times the energy demand of the farm, making it viable to sell the surplus to the National Interconnected System NIS. Additionally, the project is evaluated considering the sale of the by-product of the process as raw material for the production of biofertilizer. Finally, the risk generated by some variables of the conversion model is analyzed using Monte Carlo simulation. The results of the simulation allow us to conclude that the energy use in the pork industry of Valle del Cauca is financially feasible under the conditions proposed in this project. Additionally, positive social and environmental impacts are evaluated that contribute to the sustainable development objectives.

**Keywords:** anaerobic digestion (AD), circular economy, renewable energy, biogas, swine biomass.

## Introducción

En el presente proyecto, localizado en el departamento del Valle del Cauca, se realiza una evaluación de factibilidad financiera del aprovechamiento energético, considerando el análisis de riesgos, al tratar la biomasa residual en granjas de cerdos tipo mediante un proceso de digestión anaeróbica. Con esta energía generada, se pretende cubrir la demanda energética de la granja y poder vender el excedente al sistema de energía. Este proyecto se desarrolla bajo el marco del proyecto de regalías de Minciencias investigación y desarrollo experimental de un modelo sostenible de generación de biocombustibles y productos de valor agregado, a partir de residuos agrícolas y agroindustriales (biomasa residual) de la industria porcícola en el Valle del Cauca (CI - 1093).

En las últimas dos décadas se observa un crecimiento en la cantidad de investigaciones vinculadas con el desarrollo sostenible, desde distintos campos de las ciencias básicas y aplicadas, como la física, la biología, la ingeniería, la biotecnología, la robótica, entre otras (consulta realizada en Wizdom: <https://www.wizdom.ai/>); con el objetivo en común de satisfacer las necesidades actuales de consumo de recursos sin comprometer la capacidad de generar recursos en el futuro (Comisión Mundial sobre el Medio Ambiente y el Desarrollo, 1987).

Una de las iniciativas que le apunta a los Objetivos De Desarrollo Sostenible 6 y 7 (Comisión Económica Para América Latina y el Caribe (CEPAL), 2019), es el uso de los residuos sólidos orgánicos de la industria como fuente de energía renovable, lo que se le conoce como bioenergía. Para el cierre del año 2020, la tasa promedio anual de crecimiento mundial por regiones en la generación de bioelectricidad, alcanzaba el 6,3% marcando una fuerte tendencia al alza (REN21, 2022). En Colombia, el sector pecuario cuenta con alrededor del 77,9% de participación en uso de suelo, representado principalmente por explotación bovina (66,6%), explotación porcina (21,9%) y el excedente, por explotación de otras especies como ovejas, caballos, cabras, búfalos, mulas, asnos, cuyes, entre otros. De acuerdo con la Encuesta Nacional Agropecuaria, durante el primer semestre del 2019 tan solo el 0,6% de las unidades de producción agropecuaria utiliza la biomasa residual como insumo para la generación de energía, combustible o calor (DANE, 2020). Específicamente, en el Valle del

Cauca, según las estimaciones realizadas por la Unidad de Planeación Minero-Energética en el 2011, el potencial energético del sector porcino era de 357,97 TJ/año.

Considerando lo mencionado, la implementación de proyectos de generación de bioenergía en granjas porcícolas a través del tratamiento de los residuos podría representar una reducción de costos por la generación de energía para autoconsumo y venta, además de ingresos por venta de abono orgánico generado en el proceso. Adicionalmente, se podría generar un impacto social y ambiental al reducir la contaminación de fuentes hídricas por vertimientos, disminuir los riesgos a la salud de las personas y minimizar la dependencia de combustibles fósiles como fuente principal energética. De este modo las granjas porcícolas operan bajo un modelo de economía circular.

En este trabajo se realiza primero una búsqueda en la literatura para identificar los parámetros y variables utilizadas en el desarrollo de modelos de aprovechamiento energético en la industria porcícola. Luego, a partir de la información recolectada, se plantea el modelo financiero en hoja de cálculo proyectando los estados financieros y los respectivos flujos de caja del proyecto. Finalmente, se realiza la simulación de escenarios considerando riesgos que representan las variables a través de simulación Monte Carlo.

## **1. Planteamiento de problema**

La necesidad de mitigar el impacto al medio ambiente causado por el crecimiento en la generación de residuos y la dependencia de combustibles fósiles como fuente de energía representan un gran reto para los gobiernos a nivel mundial en las últimas décadas. Es por esto por lo que se hace relevante replantear la composición de la matriz energética, buscando reemplazar las fuentes convencionales no renovables por energías no convencionales renovables, apostándole a reducir las emisiones de gases de efecto invernadero (Corredor, 2018).

De acuerdo con las estimaciones del Banco Interamericano de Desarrollo, para el 2022, más del 12% de la capacidad de generación de energía eléctrica en Colombia será de fuentes renovables no convencionales, destacándose como un país líder en la transición energética, logrando escalar catorce posiciones en el ranking de sostenibilidad energética del Consejo Mundial de Energía y nueve posiciones en el índice de Transición Energética 2020 (Ministerio de Minas y Energía, 2021).

Recientemente, se han identificado distintas fuentes de energías no convencionales renovables de gran potencial como la biomasa residual de los sectores agrícola, pecuario y de residuos urbanos. En el Valle del Cauca, existe la oportunidad latente para las industrias porcícolas de tratar la biomasa residual del proceso productivo y convertirse en auto generadores de energía a su vez que se reduce la contaminación de aguas y tierras por disposición de estos residuos aprovechables. La industria porcícola del Valle del Cauca representa el 8% de la generación nacional de residuos porcícolas (UNAL, 2018).

Distintos autores como (González Rubio, 2016) y (León & Martín, 2016) han evaluado la factibilidad de este tipo de proyectos a través de modelos financieros y de programación lineal, asumiendo como principales supuestos el uso de variables determinísticas.

Teniendo en cuenta la necesidad de replantear la composición de la matriz energética y la oportunidad identificada en la industria porcícola del Valle del Cauca de aportar a este objetivo, se plantea la siguiente pregunta de investigación:

**¿Bajo qué escenarios es factible financieramente la generación de energía a partir de la biomasa residual de la industria porcícola en el Valle del Cauca?**

## **2. Objetivos**

### **2.1. Objetivo General**

Evaluar la factibilidad financiera del aprovechamiento energético a partir de la biomasa residual porcícola en el Valle del Cauca mediante un modelo financiero bajo un enfoque de análisis de riesgos.

### **2.2. Objetivos Específicos**

1. Identificar los parámetros y variables a considerar en el desarrollo del modelo de evaluación financiera para el aprovechamiento energético de la biomasa residual porcícola.
2. Estructurar el modelo de evaluación financiera para el aprovechamiento energético de la biomasa residual porcícola.
3. Analizar el riesgo financiero del proyecto de aprovechamiento de biomasa residual porcícola considerando diferentes escenarios mediante simulación Monte Carlo.

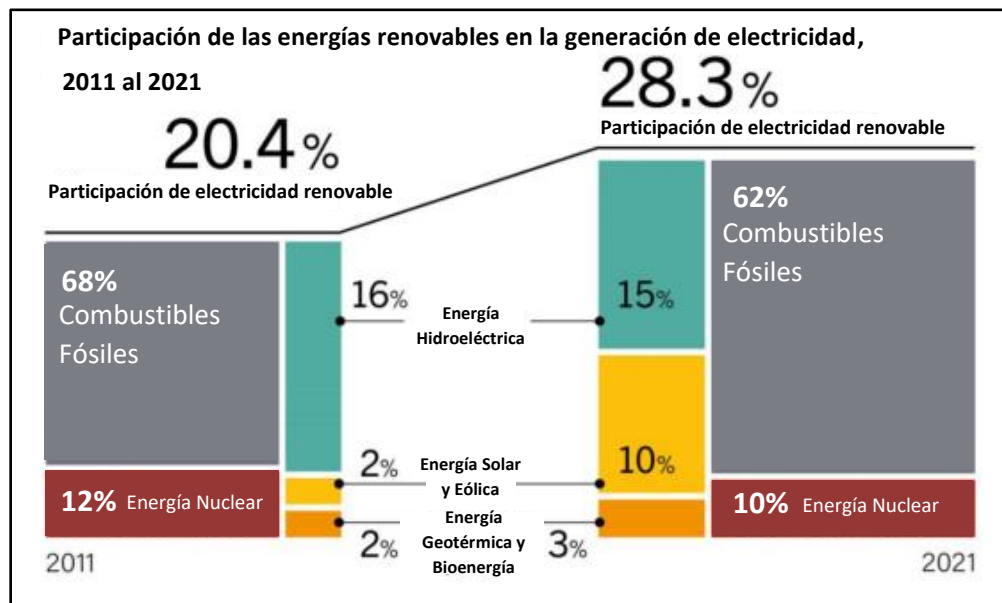
### 3. Revisión de Literatura

Existen diversas fuentes de generación de biomasa, los residuos del sector agrícola, residuos del sector pecuario y residuos sólidos orgánicos urbanos e industriales.

#### 3.1. Contexto Internacional

Para inicios de la década pasada, se estimaba que el 80% de la energía utilizada a nivel mundial provenía de fuentes fósiles y nucleares. El restante 20% provenía de energía renovable de fuentes como la hidroenergía (16%), solar y eólica (2%) y geotérmica y bioenergía (2%). Para el año 2021, la generación de energía renovable creció ocho puntos porcentuales representado principalmente en un incremento de fuentes de energía solar y eólica como lo indica la Figura 1 a continuación:

**Figura 1.** Participación de energías renovables en la generación de electricidad

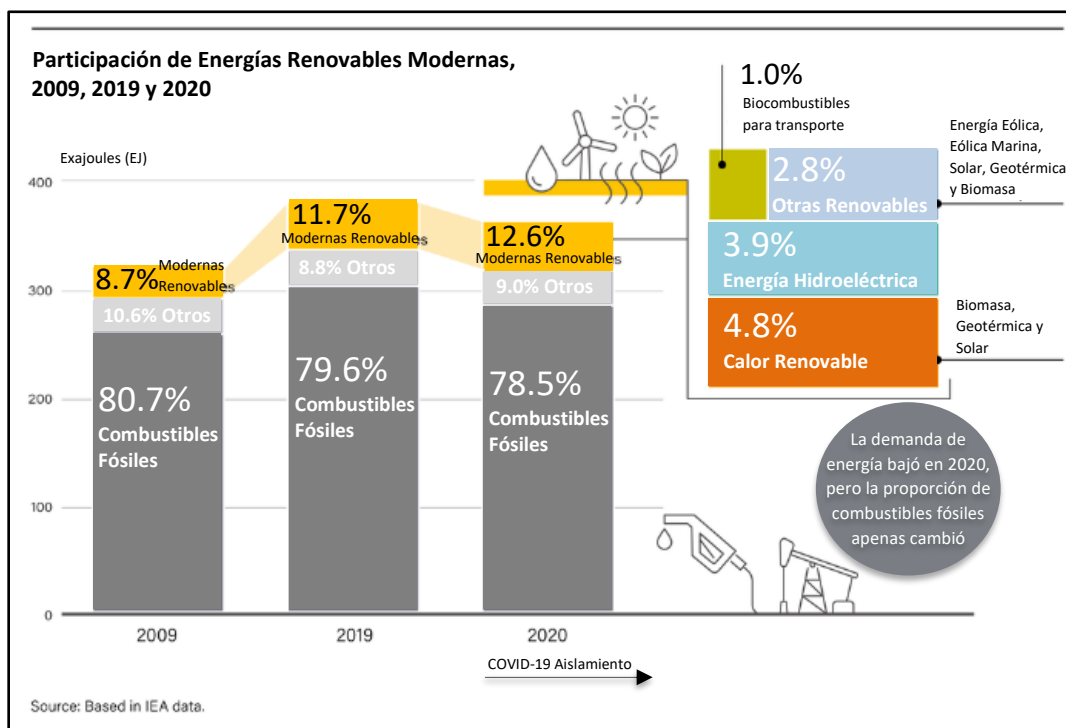


*Nota.* Tomado de (REN21, 2022).

En la Figura 2, se observa el incremento en la participación de las denominadas energías modernas renovables durante la última década, representando un incremento de casi

cuatro puntos porcentuales en 11 años reduciendo la participación de combustibles fósiles en dos puntos porcentuales.

**Figura 2.** Participación de energías renovables modernas en 2009, 2019 y 2020



*Nota.* Tomado de (REN21, 2022).

Los recientes acontecimientos de invasión de la Federación Rusa a Ucrania a comienzos del 2022 han incrementado considerablemente los precios de combustibles fósiles llevando a muchos países a aumentar su inversión en proyectos de energía renovable, buscando modificar su matriz energética a la vez que reducen las emisiones. Países como Japón, Alemania, Reino Unido, España y la Unión Europea en general plantean políticas públicas para acelerar la transición energética que permita avanzar en los objetivos climáticos y evitar la dependencia de combustibles fósiles (REN21, 2022).

En este sentido, se han venido desarrollando investigaciones en todo el mundo buscando alternativas de generación de energía. (Yeh, Chen, & Chen, 2010), en el suroeste de Taiwán donde se crían más del 70% de cabezas porcinas, plantearon un sistema semi centralizado de generación de energía a partir del estiércol porcino concluyendo que el rendimiento es favorable hasta un perímetro de 40 km. (Rahman, Woodard, Manzanares, &

Harder, 2014) en Bangladesh analizaron el potencial de usar materias primas provenientes de explotaciones de ganado, granjas avícolas y mercados de ganado donde se produce estiércol mezclado con paja de arroz concluyendo en su estudio que esta energía podría satisfacer las necesidades de cocina para 30 millones de personas en el país. (León & Martín, 2016) plantearon un modelo de programación no lineal entera mixta (MINLP) para evaluar un proyecto de generación de energía en España a partir de residuos de la industria porcícola y bovina mediante el uso de una turbina de gas y de vapor para generar energía eléctrica y fertilizante logrando reducir el costo de la electricidad en un 57%. Villacrés (2017) construyó una instalación experimental de biodigestor en una granja del Ecuador con el objetivo de evaluar la factibilidad financiera de generar bioenergía. Los resultados financieros arrojaron un VPN positivo, una TIR del 41% por lo que concluyó que la generación de energía a partir de residuos porcícolas es factible además de generar impactos positivos al ambiente. (Dennely, y otros, 2017) en Irlanda desarrollaron un modelo de análisis financiero con simulación Monte Carlo para tres escenarios de tamaños de granjas concluyendo que la monodigestión del estiércol no es viable, por otra parte, la codigestión es viable en pequeñas y grandes explotaciones bajo ciertas condiciones planteadas. (Venegas, Raj & Pinto, 2019) en el estado de Chiapas de México desarrollaron un modelo de conversión energética teórico para los residuos de 39 granjas tecnificadas del estado para tamaños de granjas de 500 y 1000 cerdos el cual concluye que es rentable de acuerdo con los resultados del VPN, TIR y relación Costo/Beneficio. (Araujo da Silva Junior, Michaelsen, Scalvi, & Teixeira Gomes Pacheco, 2020) estimaron el potencial de generación para la región de Santa Catarina del Brasil concluyendo en su estudio que se lograría abastecer el 2% de la energía consumida. (Di Fraia, Fabozzi, Macaluso, & Vanoli, 2020) en una región del sur de Italia estimaron el potencial energético teórico de generación de energía a partir de la biomasa residual de la agroindustria concluyendo que el potencial de bioenergía recuperable puede cubrir hasta el 16% de la demanda térmica. (Bhatt & Tao, 2020) en Estados Unidos realizaron una evaluación técnica de los desafíos y retos que implica la generación de bioenergía mediante cuatro tipos de materias primas entre ellas el estiércol porcino y grasa concluyendo que existe un potencial para los productores e inversionistas en generación de ahorros en costos para producción de biogás y lograr la adecuada gestión de recursos. (Barrera, y otros, 2020) estudiaron el impacto en la matriz energética de una granja porcícola en Cuba mediante la generación de energía a

partir de los residuos generados. En este trabajo se concluyó que el potencial de generación energética a partir de los residuos de la granja porcícola es 10 veces la energía consumida, por lo que es viable la venta al sistema nacional interconectado y reemplazar completamente la composición de la matriz energética de la granja. (Laviola de Oliveira, Fernandes, Renato, & Borges, 2021) estimaron el potencial energético con datos teóricos en una región del Brasil y usaron un software para optimizar la asignación de plantas de biogás en función de su potencial y ubicación geográfica. En esta evaluación se utilizó la conversión de biometano mediante motor de combustión (28% eficiencia) y de ciclo combinado (65% eficiencia) concluyendo que estas iniciativas podrían respaldar el consumo de energía en zonas rurales del país y aumentar la seguridad eléctrica nacional. Recientemente, (Córdova, y otros, 2021) analizaron el impacto en el rendimiento de generación de biogás al adicionar polvo de magnetita al estiércol porcino concluyendo que los resultados de codigestión son favorables en comparación a la monodigestión, bajo condiciones experimentales.

### **3.2. Contexto Nacional**

Según Porkcolombia (2020), en Colombia, la implementación de proyectos de generación de energía a partir de biomasa residual surgió principalmente como respuesta a los problemas de tratamiento de aguas residuales y de daños generados a la salud. Debido a esto, hoy en día se han desarrollado diversos proyectos en sectores como el palmicultor, el avícola, el porcícola, el cervecero, el lechero, el azucarero, entre otros. Sin embargo, la falta de información y despliegue con pequeños productores para una adecuada gestión del proyecto ha resultado en proyectos no factibles. Como respuesta a la necesidad de transición energética del país, el gobierno nacional con su Estrategia Nacional de Economía Circular busca incentivar la implementación de modelos de negocio que incorporen la gestión de residuos con un enfoque sostenible por lo que las alianzas y la colaboración entre autores es fundamental para transformar la economía (Porkcolombia, 2020).

(Galán Riveros, 2016) estimó el potencial energético de la biomasa residual agrícola en Colombia mediante el análisis de casos de éxito de implementación de plantas de cogeneración en los que se logra autoabastecer el consumo e incluso comercializar los excedentes. Entre estas, menciona compañías del sector azucarero como Ingenio

Providencia, Riopaila Castilla, Manuelita y de otros sectores como pastas Doria, Corona, Tecnoglass, Cartón Colombia, entre otras. Castro et al., (2017) evaluaron el comportamiento de la generación de biogás a partir de estiércol de ganado en zona rural del país usando un biodigestor tubular de bajo costo operando en condiciones reales proporcionando un ahorro energético del 76%. Rodríguez & Morales (2017) estimaron el potencial eléctrico teórico del biogás generado a partir de la biomasa bovina y porcícola en zonas no interconectadas del país concluyendo que la energía generada podría abastecer mas de 64 mil hogares. Garfí et al., (2019) evaluaron el uso de biodigestores tubulares a pequeña escala en dos granjas ubicadas en la región Caribe y Andina en condiciones ambientales particulares para cada caso, encontrando en ambas granjas resultados de hasta un 80% de reducción en gastos de gas licuado de petróleo (GLP) y fertilizantes sintéticos usados en suelos demostrando que la implementación de plantas generadoras de biogás en Colombia representa una oportunidad para el desarrollo de las comunidades rurales. En el 2020, la Universidad Distrital Francisco José de Caldas realizó una investigación con el objetivo de presentar información concreta acerca de las oportunidades de generación de energía usando la biomasa como fuente en la región central del país. Dentro de las conclusiones de esta investigación, se encontró que la Biomasa como fuente de energía a pesar del potencial de generación de energía, la cantidad de proyectos en ejecución son escasos. (Ruiz & Gómez, 2020) crearon un prototipo de biodigestor de un metro cubico en una granja porcícola del llano colombiano donde se logró generar energía usando un motogenerador que funciona con biogás para cubrir parte de la demanda energética de la granja representando un ahorro en el proceso productivo. Florez (2021) desarrolló una aplicación en Excel para estimar el potencial de producción de metano a partir de datos teóricos, experimentales y de campo en cuatro granjas porcícolas concluyendo que la cantidad de metano generada representa un potencial de ahorro energético para la industria porcícola si se convierte en energía, pero es necesario considerar un tratamiento adecuado para maximizar este potencial. (Gámez Ávila, Lozano Triana, Cervera González, & Quintero Jaramillo, 2022) evaluaron la producción de biogás a partir de la digestión y codigestión anaerobia usando estiércol de cerdo y residuos vegetales en el departamento del Tolima mediante bioensayos a escala de laboratorio concluyendo que la codigestión también es una alternativa de aprovechamiento de residuos.

Considerando la revisión de literatura anterior, existen diversas posibilidades de aprovechamiento de los residuos generados en la industria porcícola representando beneficios económicos para las granjas y ambientales para su ecosistema.

## **4. Desarrollo Metodológico**

A continuación, se detallan los parámetros y variables definidos, la proyección y el análisis de riesgos financieros del modelo desarrollado para evaluar la factibilidad de proyectos de aprovechamiento energético en el Valle del Cauca.

### **4.1. Parámetros del Modelo**

Para el año 2020, el Fondo Nacional de la Porcicultura (Porkcolombia) en el marco del programa de sostenibilidad ambiental y responsabilidad social empresarial con el apoyo del Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible elaboraron la guía del biogás para el sector porcícola donde se especifica la metodología para estimar el potencial de generación de energía además de los detalles para la instalación, la producción, el mantenimiento y la operación. Para el desarrollo de este proyecto, se consideran principalmente los parámetros relacionados en la guía de Porkcolombia mencionada.

#### **4.1.1. Supuestos del Modelo**

Para efectos de evaluar la implementación del proyecto en la industria porcícola del Valle del Cauca, se considera el inventario promedio de cerdos en granjas tecnificadas en el departamento para el 2021 presentado por (Instituto Colombiano Agropecuario ICA, 2022). Adicional, se supone una proporción etaria de los cerdos con la metodología presentada en Porkcolombia (2020), la cual se mantiene a lo largo del tiempo del proyecto.

#### **4.1.2. Parámetros de Conversión de Excretas en Energía**

Para estimar la cantidad de residuos generados por una granja de cerdos, dentro de los parámetros del modelo se encuentra el inventario promedio de una granja por cada uno de los siete grupos de cerdos, estableciendo la proporción de cada grupo dentro de la granja. A partir de este inventario, se calcula la unidad animal equivalente para consolidar la generación de residuos totales anuales de la granja los cuales se conocerán en adelante como porquinaza. Siguiendo los pasos de la guía de Porkcolombia, mediante un proceso de digestión anaeróbica con la porquinaza anual generada se calculan la cantidad de sólidos

volátiles, la cantidad de biogás y la cantidad de energía generada. Una vez calculada la generación de energía, se calcula la cantidad de bioabono usando el factor de conversión planteado en (Alvarez Montoya & Sánchez Giraldo, 2020) que asume 0,6033 kg de bioabono por cada Kwh generado a partir del biogás. Este bioabono o abono orgánico al ser subproducto del proceso de digestión anaeróbica y conservar algunos nutrientes del proceso, tiene gran potencial de comercialización como fertilizante para cultivos luego de algunos tratamientos posteriores los cuales no son del alcance de este trabajo. En la Tabla 1, se detallan los cálculos.

**Tabla 1.** Parámetros de conversión del modelo

| <b><u>1. Inventario de granjas Porcícolas</u></b>                            |                       |                        |
|------------------------------------------------------------------------------|-----------------------|------------------------|
| <b>Inventario de Cerdos</b>                                                  | <b># Animales</b>     | <b>Peso Total (kg)</b> |
| lechones lactantes (Grupo 1)                                                 | 682                   | 3.405                  |
| Precebo (Grupo 2)                                                            | 1534                  | 36.816                 |
| Levante (Grupo 3)                                                            | 767                   | 26.845                 |
| Ceba (Grupo 4)                                                               | 768                   | 34.515                 |
| Hembras de reemplazo (Grupo 5)                                               | 153                   | 18.360                 |
| Hembras de cría (Grupo 6)                                                    | 187                   | 46.750                 |
| Machos (Grupo 7)                                                             | 9                     | 1.920                  |
| <b>Total</b>                                                                 | <b>4100</b>           | <b>168.611</b>         |
| Unidad de Equivalente Animal (UEA)                                           | 113,7 kg de peso vivo |                        |
| Unidades animales                                                            | 1483 EAU              |                        |
| <b><u>2. Generación de Porquinaza</u></b>                                    |                       |                        |
| Porquinaza / EAU (Tons/año)                                                  | 19                    |                        |
| Total de porquinaza (Tons/año)                                               | 28.176                |                        |
| <b><u>3. Estimación de sólidos volátiles</u></b>                             |                       |                        |
| Materia seca                                                                 | 7%                    |                        |
| Sólidos volátiles                                                            | 80%                   |                        |
| Cenizas                                                                      | 20%                   |                        |
| Sólidos volátiles (SV) Tons/año                                              | 185                   |                        |
| <b><u>4. Estimación de la cantidad de biogás en Digestión Anaeróbica</u></b> |                       |                        |
| 1 kg de SV genera aprox                                                      | 400 lt biogás         |                        |
| Producción biogás (m3/año)                                                   | 1.578                 |                        |
| <b><u>5. Estimación de la cantidad de energía</u></b>                        |                       |                        |
| Factor conversión 1 m3 = 0,8175kwh                                           | 631.142               |                        |
| <b><u>6. Estimación de la cantidad de bioabono</u></b>                       |                       |                        |
| Factor conversión 1 Kwh = 0,6033 kg abono                                    | 515.951               |                        |

*Nota.* Cálculos realizados a partir de modelo de (Porkcolombia, 2020).

Según los datos de la Tabla 1, los 4100 cerdos de una granja promedio pesan alrededor de 168 ton y generan alrededor de 28 ton de excremento (Porquinaza) al año, lo que representa un total de 515.951 Kwh de energía generada al año.

#### **4.1.3. Consumo de Energía en Granjas**

Para estimar el consumo de energía promedio en granjas porcícolas, se tomaron como referentes los consumos reales de dos proyectos calculando el consumo de energía anual por cabeza en promedio, en la Tabla 2 se observa el resultado. A partir de esta información se calculará el consumo de energía de este proyecto.

**Tabla 2.** Consumo de energía en granjas porcinas

| <b>Consumo de energía en granjas porcinas</b> |                 |                 |                 |                 |                 |                 |
|-----------------------------------------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| <b>Elemento</b>                               | <b>Granja 1</b> | <b>Granja 2</b> | <b>Granja 3</b> | <b>Granja 4</b> | <b>Granja 5</b> | <b>Granja 6</b> |
| Inventario de cerdos en granja                | 28910           | 23828           | 7684            | 8138            | 6700            | 34              |
| Consumo energía aproximado (kwh.mes)          | 24830           | 22612           | 4960            | 9468            | 7620            | 57              |
| Consumo por cabeza (kwh.mes)                  | 0,86            | 0,95            | 0,65            | 1,16            | 1,14            | 1,68            |
| <b>Promedio por cabeza (Kwh.año)</b>          | <b>12,86</b>    |                 |                 |                 |                 |                 |

*Nota.* Estimaciones de consumo energético por cabeza para diversos proyectos mostrados por González Rubio (2016) y (Gutiérrez mantilla & Bernal Ochoa, 2020).

De acuerdo con la Tabla 2, la energía consumida durante el proceso productivo para los 4100 cerdos es de 52.726 Kwh, lo cual representa el 10,2% de la energía generada en el proceso de digestión anaeróbica. El 89,8% de energía generada es potencial de aprovechar para otros procesos o para la venta al Sistema Interconectado Nacional.

#### **4.1.4. Proyección de Precio de Energía**

Para estimar la proyección del precio de la energía a lo largo del proyecto, se tomó como referente el precio de negociación de contratos futuros de energía eléctrica hasta el 2029. A partir del 2029, se calcula el precio considerando el incremento porcentual promedio de los años anteriores del proyecto (Derivex, 2022).

#### **4.1.5. Ingresos del Proyecto**

**Ahorro por Autoconsumo de Energía.** El costo de la energía consumida en la granja se considera como un ahorro del proyecto dado que con la energía generada se pretende en primer lugar, cubrir la demanda de la granja y el excedente transferirlo al Sistema Interconectado Nacional (SIN).

**Venta de Energía al SIN.** El excedente de energía generada representa un ingreso por venta considerando los precios de energía proyectados.

**Venta de Bioabono.** Durante el proceso de digestión anaeróbica, además del biogás generado, se produce un subproducto con alto potencial de comercialización como fertilizante orgánico. Esta venta se considera como un escenario de implementación del proyecto en el que se comercializa como materia prima de un tercero.

**Beneficios tributarios.** Dentro de los beneficios de ley por tratarse de proyectos de generación de energía no convencional se tienen incentivos de renta (deducción del 50% de inversión de la renta durante los primeros 5 años, es decir 10% anual), incentivos contables (depreciación acelerada de activos) e incentivos arancelarios e IVA (exclusión de aranceles para algunos activos). En el alcance de este proyecto solo se considera el incentivo contable que consiste en depreciar las inversiones de los activos en corto plazo para disminuir la base gravable de impuestos y aumentar el flujo de caja.

#### **4.1.6. Costos de Inversión del Proyecto (CAPEX)**

El alcance de inversión de este proyecto considera ya establecido el negocio de producción porcícola en granjas tecnificadas y se enfoca en la oportunidad de tratar los residuos de esta actividad principal. Dentro del alcance de inversión del proyecto se encuentra la instalación del biodigestor, los equipos de generación de energía y los equipos y adecuaciones necesarias para funcionamiento bidireccional con la comercializadora de energía.

**Adquisición y Montaje Biodigestor.** De acuerdo con la metodología planteada en la guía de Porkcolombia, el montaje del biodigestor se trata de tecnología intermedia, funcionamiento semicontinuo y de bajo costo. Para estimar el costo de inversión en el proyecto se consideran los datos de proyectos anteriores implementados en Colombia

mostrados en la Figura 3 y a partir de estos se realiza una regresión lineal para hallar la ecuación del costo de inversión por cabeza. Como se muestra en la Figura 4, la función logarítmica se adapta con un índice de correlación superior al 90%.

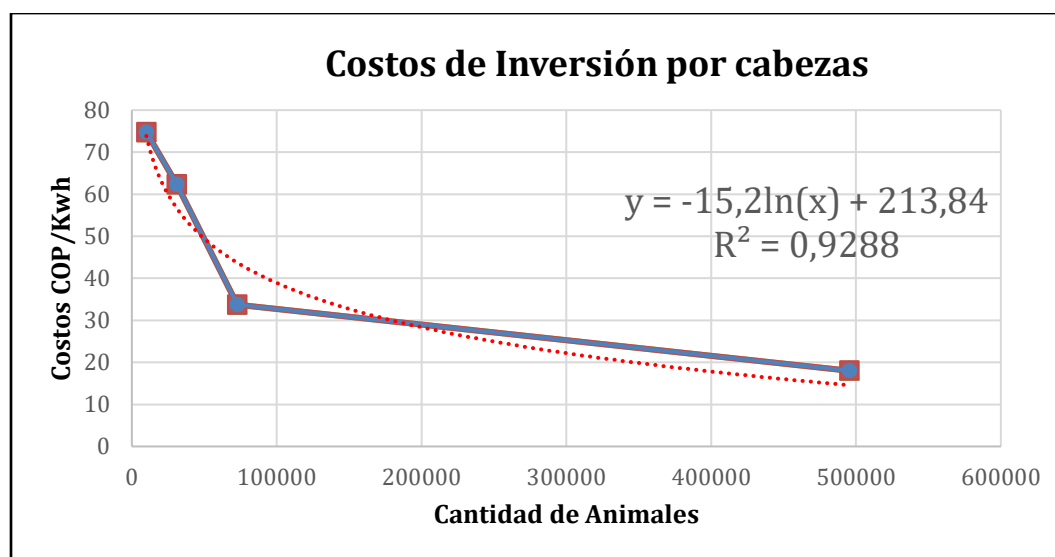
**Figura 3.** Costos de inversión de otros proyectos

| Proyectos generación energía eléctrica | USD/kWh | COP/kWh | ton biomasa/año |
|----------------------------------------|---------|---------|-----------------|
| Palma (30 ton RFF/hora - 10540 Ha)     | 0,028   | 83,93   | 144.000         |
| Porquinaza (72800 animales)            | 0,011   | 33,73   | 46.501          |
| Porquinaza (495456 animales)           | 0,006   | 18,01   | 108.528         |
| Porquinaza (31000 animales)            | 0,020   | 62,32   | 19.801          |
| Porquinaza (10000 animales)            | 0,025   | 74,78   | 6.388           |

Fuente: (FEDEPALMA, 2015), Aliar S.A. (La Fazenda 2017), (Carrasco A., 2015), Aqualimpia Engineering e.K. (AQL) 2017

*Nota.* Tomado de (UNAL, 2018).

**Figura 4.** Regresión lineal costos de inversión por cabezas de cerdos



*Nota.* Elaboración propia.

**Adquisición Equipos de Generación.** Con base en los resultados de energía generada del proyecto, se cotizan los equipos de generación para una potencia máxima de 100 Kw. Debido a que la cotización se realiza en el extranjero se deben considerar también costos de transporte internacional, procesos de aduanas, impuestos y aranceles a la importación y transporte nacional. Considerando la capacidad de generación y la capacidad de los equipos cotizados se tiene un factor de planta de 60% aproximadamente.

**Equipos de Transferencia al SIN.** Para estimar el costo de los equipos de conexión al SIN, se usa el referente presentado en (Unidad de Planeación Minero Energética UPME, 2015) donde se establece que para proyectos con biomasa donde se presente excedente de energía el cual se vende, se requiere la construcción de subestaciones y líneas de interconexión.

#### **4.1.7. Costos de Operación del Proyecto (OPEX)**

Dentro de los costos de operación y mantenimiento de proyecto se considera un componente fijo y un componente variable dado que existen factores asociados a la inversión inicial y otros asociados a la operación de los equipos. Ambos costos se calculan en función de la energía generada por el proyecto. Los parámetros considerados para los cálculos se presentan en (Bueno López, Rodríguez Sarmiento, & Rodríguez Sánchez, 2016).

##### **4.1.7.1. Esquema de Financiación del Proyecto**

Para la financiación del proyecto se utilizará un esquema 70% deuda y 30% inversión con capital propio. La tasa del costo del capital propio se asume del 25% considerando la expectativa de inversionistas de empresas listadas en bolsa de algunos países latinoamericanos (Corficolombiana, 2022) más 3 puntos porcentuales. La tasa del costo de deuda se deriva de financiar el porcentaje del proyecto con el fondo para el financiamiento del sector agrícola FINAGRO a través de crédito Finagro de Bancolombia el cual establece una tasa DTF+10%. Para el proyecto se asume la DTF promedio de junio del 2022 a enero del 2023 resultando una tasa del 22,4% (FINAGRO, 2022) (Bancolombia, 2023) (Banco de la república, 2023).

A partir de las tasas presentadas, se calcula el Weighted Average Cost of Capital (WACC) reemplazando los datos en la Ecuación 1, el cual se utilizará como tasa de descuento en la estimación del Valor Presente Neto (VPN) y el Levelized Cost Of Energy (LCOE) del proyecto. A continuación, se presenta el cálculo del WACC:

$$\text{Ecuación 1} \quad WACC = \left( \frac{D}{E+D} \right) * Kd * (1 - t) + \left( \frac{E}{E+D} \right) * Ke$$

$$WACC = 70\% * 22,4\% * (1 - 35\%) + 30\% * 25\% = 17,69\%$$

Siendo,

$D$  el valor de la deuda a financiar  
 $E$  el valor del capital propio  
 $K_d$  la tasa del costo de deuda  
 $K_e$  la tasa del costo de capital propio  
 $t$  la tasa de impuestos.

## 4.2. Variables del Modelo

Para evaluar el modelo financiero se utilizan como variables de desempeño el Valor Presente Neto (VPN), la Tasa Interna de Retorno (TIR) y el Costo Nivelado de Energía (LCOE, por sus siglas en inglés), estimados para la proyección a 15 años de los flujos de caja del proyecto, tiempo de vida útil de la infraestructura a implementar.

### 4.2.1. Costo Nivelado de Energía (LCOE)

Para estimar el costo de energía nivelado se utiliza el método del *Fraunhofer Institute For Solar Energy Systems* (ISE) el cual se basa en la premisa de que los ingresos provienen de la energía generada como se plantea en este caso. Se calcula dividiendo el valor presente de los costos de inversión, costos fijos y variables durante la vida útil del proyecto con una tasa de descuento definida sobre el valor presente de la energía anual generada asumiendo este valor como monetario con la misma tasa de descuento (ISE, 2021).

**Figura 5.** Costo nivelado de electricidad por tecnología 2010-2021

| <b>Tabla S.1</b> Tendencias del costo total medio ponderado mundial de instalación, del factor de capacidad y del costo nivelado de la electricidad por tecnología, 2010-2021 |                               |       |                      |                     |      |                      |                                   |       |                      |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------|-------|----------------------|---------------------|------|----------------------|-----------------------------------|-------|----------------------|
|                                                                                                                                                                               | Costos totales de instalación |       |                      | Factor de capacidad |      |                      | Costo nivelado de la electricidad |       |                      |
|                                                                                                                                                                               | (2021 USD/kWh)                |       |                      | (%)                 |      |                      | (2021 USD/kWh)                    |       |                      |
|                                                                                                                                                                               | 2010                          | 2021  | Variación porcentual | 2010                | 2021 | Variación porcentual | 2010                              | 2021  | Variación porcentual |
| Bioenergía                                                                                                                                                                    | 2 714                         | 2 353 | -13 %                | 72                  | 68   | -6 %                 | 0.078                             | 0.067 | -14 %                |
| Geotérmica                                                                                                                                                                    | 2 714                         | 3 991 | 47 %                 | 87                  | 77   | -11 %                | 0.050                             | 0.068 | 34 %                 |
| Hidroeléctrica                                                                                                                                                                | 1 315                         | 2 135 | 62 %                 | 44                  | 45   | 2 %                  | 0.039                             | 0.048 | 24 %                 |
| Solar FV                                                                                                                                                                      | 4 808                         | 857   | -82 %                | 14                  | 17   | 25 %                 | 0.417                             | 0.048 | -88 %                |
| CSP                                                                                                                                                                           | 9 422                         | 9 091 | -4 %                 | 30                  | 80   | 167 %                | 0.358                             | 0.114 | -68 %                |
| Eólica terrestre                                                                                                                                                              | 2 042                         | 1 325 | -35 %                | 27                  | 39   | 44 %                 | 0.102                             | 0.033 | -68 %                |
| Eólica marina                                                                                                                                                                 | 4 876                         | 2 858 | -41 %                | 38                  | 39   | 3 %                  | 0.188                             | 0.075 | -60 %                |

*Nota.* Tomado de (IRENA, 2022).

En la Figura 5, se presentan los valores de referencia del costo nivelado de energía para distintas tecnologías según el informe de la agencia internacional de energías renovables IRENA.

### 4.3. Modelo Financiero

Una vez establecidos los parámetros y variables del modelo, se proyectan a 15 años los flujos del proyecto calculando el flujo de caja libre. Se consideran 15 años debido a que es la vida útil del biodigestor. Se asume una tasa de impuestos del 35% y para la variación de los costos de operación y mantenimiento se proyecta el Índice de Precios al Productor (IPP) durante los próximos 15 años tomando como base la ecuación de la recta de la tendencia de los últimos 23 años de variación anual reportados por el (DANE, 2023). A continuación, en la Figura 6 se muestran las proyecciones del flujo de caja libre para el proyecto.

**Figura 6.** Proyección del flujo de caja libre del proyecto

|                                                 | Año 0<br>(2023)      | Año 1<br>(2024)    | Año 2<br>(2025)    | Año 3<br>(2026)    | Año 4<br>(2027)    | Año 5<br>(2028)    | Año 6<br>(2029)    | Año 7<br>(2030)    |
|-------------------------------------------------|----------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|
| Energía generada kwh                            | 463.220              | 463.220            | 463.220            | 463.220            | 463.220            | 463.220            | 463.220            | 463.220            |
| Proyección Variación anual IPP                  |                      | 8,43%              | 8,61%              | 8,79%              | 8,97%              | 9,15%              | 9,33%              | 9,51%              |
| Costo Energía (\$/Kwh)                          | 352                  | 376                | 399                | 352                | 360                | 364                | 364                | 367                |
| Porcentaje variación costo energía              |                      | 6,89%              | 6,08%              | -11,78%            | 2,27%              | 0,99%              | 0,20%              |                    |
| <b>Ingresos</b>                                 |                      | <b>174.235.743</b> | <b>184.824.963</b> | <b>163.053.601</b> | <b>166.759.365</b> | <b>168.417.694</b> | <b>168.746.581</b> | <b>170.054.897</b> |
| Costos Operación y mtto                         |                      | 54.431.508         | 59.118.061         | 64.314.538         | 70.083.553         | 76.496.198         | 83.633.293         | 91.586.819         |
| <b>EBITDA</b>                                   |                      | <b>119.804.235</b> | <b>125.706.902</b> | <b>98.739.063</b>  | <b>96.675.812</b>  | <b>91.921.496</b>  | <b>85.113.288</b>  | <b>78.468.078</b>  |
| Depreciación (-)                                |                      | 46.728.071         | 46.728.071         | 46.728.071         | 46.728.071         | 46.728.071         | 0                  | 0                  |
| <b>Utilidad Antes de Impuestos UAI</b>          |                      | <b>73.076.164</b>  | <b>78.978.830</b>  | <b>52.010.991</b>  | <b>49.947.741</b>  | <b>45.193.425</b>  | <b>85.113.288</b>  | <b>78.468.078</b>  |
| Impuestos (35%) (-)                             |                      | 25.576.657         | 27.642.591         | 18.203.847         | 17.481.709         | 15.817.699         | 29.789.651         | 27.463.827         |
| <b>Utilidad Despues de Impuestos UDI</b>        |                      | <b>47.499.506</b>  | <b>51.336.240</b>  | <b>33.807.144</b>  | <b>32.466.032</b>  | <b>29.375.726</b>  | <b>55.323.637</b>  | <b>51.004.251</b>  |
| Depreciación (+)                                |                      | 46.728.071         | 46.728.071         | 46.728.071         | 46.728.071         | 46.728.071         | 0                  | 0                  |
| Inversión Inicial                               | 233.640.357          |                    |                    |                    |                    |                    |                    |                    |
| Capital de Trabajo Neto operativo CTNO          |                      | 4.535.959          | 4.926.505          | 5.359.545          | 5.840.296          | 6.374.683          | 6.969.441          | 7.632.235          |
| Variación en CTNO                               | - 4.535.959 -        | - 390.546 -        | - 433.040 -        | - 480.751 -        | - 534.387 -        | - 594.758 -        | - 662.794 -        | - 739.564          |
| Otros Ingresos                                  |                      | 19.834.060         | 21.039.480         | 18.561.145         | 18.982.989         | 19.171.765         | 19.209.203         | 19.358.135         |
| <b>Flujo De Caja Libre</b>                      | <b>- 238.176.316</b> | <b>113.671.092</b> | <b>118.670.751</b> | <b>98.615.610</b>  | <b>97.642.705</b>  | <b>94.680.804</b>  | <b>73.870.046</b>  | <b>69.622.822</b>  |
|                                                 | Año 8<br>(2031)      | Año 9<br>(2032)    | Año 10<br>(2033)   | Año 11<br>(2034)   | Año 12<br>(2035)   | Año 13<br>(2036)   | Año 14<br>(2037)   | Año 15<br>(2038)   |
| Energía generada kwh                            | 463.220              | 463.220            | 463.220            | 463.220            | 463.220            | 463.220            | 463.220            | 463.220            |
| Proyección Variación anual IPP                  | 9,69%                | 9,87%              | 10,05%             | 10,23%             | 10,41%             | 10,59%             | 10,77%             | 10,95%             |
| Costo Energía (\$/Kwh)                          | 370                  | 373                | 376                | 379                | 382                | 385                | 388                | 391                |
| Porcentaje variación costo energía              |                      |                    |                    |                    |                    |                    |                    |                    |
| <b>Ingresos</b>                                 | <b>171.373.357</b>   | <b>172.702.039</b> | <b>174.041.023</b> | <b>175.390.388</b> | <b>176.750.214</b> | <b>178.120.584</b> | <b>179.501.578</b> | <b>180.893.280</b> |
| Costos Operación y mtto                         | 100.461.582          | 110.377.140        | 121.470.043        | 133.896.428        | 147.835.046        | 163.490.777        | 181.098.734        | 200.929.045        |
| <b>EBITDA</b>                                   | <b>70.911.775</b>    | <b>62.324.899</b>  | <b>52.570.980</b>  | <b>41.493.960</b>  | <b>28.915.168</b>  | <b>14.629.807</b>  | <b>1.597.156</b>   | <b>20.035.766</b>  |
| Depreciación (-)                                | 0                    | 0                  | 0                  | 0                  | 0                  | 0                  | 0                  | 0                  |
| <b>Utilidad Antes de Impuestos UAI</b>          | <b>70.911.775</b>    | <b>62.324.899</b>  | <b>52.570.980</b>  | <b>41.493.960</b>  | <b>28.915.168</b>  | <b>14.629.807</b>  | <b>1.597.156</b>   | <b>20.035.766</b>  |
| Impuestos (35%) (-)                             | 24.819.121           | 21.813.715         | 18.399.843         | 14.522.886         | 10.120.309         | 5.120.432          | 559.004            | 7.012.518          |
| <b>Utilidad Despues de Impuestos UDI</b>        | <b>46.092.654</b>    | <b>40.511.184</b>  | <b>34.171.137</b>  | <b>26.971.074</b>  | <b>18.794.859</b>  | <b>9.509.374</b>   | <b>1.038.151</b>   | <b>13.023.248</b>  |
| Depreciación (+)                                | 0                    | 0                  | 0                  | 0                  | 0                  | 0                  | 0                  | 0                  |
| Inversión Inicial                               |                      |                    |                    |                    |                    |                    |                    |                    |
| Capital de Trabajo Neto operativo CTNO          | 8.371.798            | 9.198.095          | 10.122.504         | 11.158.036         | 12.319.587         | 13.624.231         | 15.091.561         | 16.744.087         |
| Variación en CTNO                               | - 826.297 -          | - 924.409 -        | - 1.035.532 -      | - 1.161.552 -      | - 1.304.644 -      | - 1.467.330 -      | - 1.652.526        | - 16.744.087       |
| Otros Ingresos                                  | 19.508.221           | 19.659.471         | 19.811.894         | 19.965.499         | 20.120.294         | 20.276.289         | 20.433.494         | 20.591.918         |
| <b>Flujo De Caja Libre</b>                      | <b>64.774.579</b>    | <b>59.246.247</b>  | <b>52.947.499</b>  | <b>45.775.021</b>  | <b>37.610.509</b>  | <b>28.318.334</b>  | <b>17.742.817</b>  | <b>24.312.758</b>  |
| <b>Valor Presente Neto VPN</b>                  | <b>209.415.776</b>   |                    |                    |                    |                    |                    |                    |                    |
| <b>Tasa Interna de Retorno TIR</b>              | <b>42,1%</b>         |                    |                    |                    |                    |                    |                    |                    |
| <b>Costo nivelado de energía LCOE (COP/KWh)</b> | <b>279,67</b>        |                    |                    |                    |                    |                    |                    |                    |
| <b>Costo nivelado de energía LCOE (USD/KWh)</b> | <b>0,0747</b>        |                    |                    |                    |                    |                    |                    |                    |

*Nota.* Elaboración propia.

En los resultados del escenario base se observa un VPN positivo, una TIR superior al WACC y un LCOE competitivo de acuerdo con el referente presentando en la Figura 5.

#### 4.3.1. Escenario con Venta de Bioabono

Teniendo en cuenta la posibilidad de generar como subproducto del proyecto un material con potencial de uso como fertilizante orgánico en cultivos, se plantea el escenario del proyecto donde se consideran ingresos por venta de este bioabono considerando la venta al 50% del precio actual de bioabono del mercado dado que el proyecto no contempla ningún tratamiento ni disposición adecuada para esta materia prima. A continuación, en la Figura 7 se muestran las proyecciones del flujo de caja libre para el proyecto con el ingreso por venta de bioabono.

**Figura 7.** Proyección del flujo de caja libre del proyecto con venta de bioabono

|                                                 | Año 0<br>(2023)      | Año 1<br>(2024)    | Año 2<br>(2025)    | Año 3<br>(2026)    | Año 4<br>(2027)    | Año 5<br>(2028)    | Año 6<br>(2029)    | Año 7<br>(2030)    |
|-------------------------------------------------|----------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|
| Energía generada kwh                            | 463.220              | 463.220            | 463.220            | 463.220            | 463.220            | 463.220            | 463.220            | 463.220            |
| Proyección Variación anual IPP                  |                      | 8,43%              | 8,61%              | 8,79%              | 8,97%              | 9,15%              | 9,33%              | 9,51%              |
| Costo Energía (\$/Kwh)                          | 352                  | 376                | 399                | 352                | 360                | 364                | 364                | 367                |
| Porcentaje variación costo energía              |                      | 6,89%              | 6,08%              | -11,78%            | 2,27%              | 0,99%              | 0,20%              |                    |
| Cantidad Abono generada Kg/año                  |                      | 311273             | 311273             | 311273             | 311273             | 311273             | 311273             | 311273             |
| Precio Venta Abono (\$/kg)                      |                      | 330                | 358                | 390                | 425                | 464                | 507                | 555                |
| Ingresos por venta abono                        |                      | 102.720.165        | 111.564.372        | 121.370.880        | 132.257.848        | 144.359.441        | 157.828.177        | 172.837.636        |
| Ingresos por venta energía                      |                      | 174.235.743        | 184.824.963        | 163.053.601        | 166.759.365        | 168.417.694        | 168.746.581        | 170.054.897        |
| <b>Ingresos Totales</b>                         |                      | <b>276.955.909</b> | <b>296.389.334</b> | <b>284.424.481</b> | <b>299.017.213</b> | <b>312.777.135</b> | <b>326.574.757</b> | <b>342.892.533</b> |
| Costos Operación y mto                          |                      | 54.431.508         | 59.118.061         | 64.314.538         | 70.083.553         | 76.496.198         | 83.633.293         | 91.586.819         |
| <b>EBITDA</b>                                   |                      | <b>222.524.400</b> | <b>237.271.274</b> | <b>220.109.943</b> | <b>228.933.660</b> | <b>236.280.937</b> | <b>242.941.465</b> | <b>251.305.714</b> |
| Depreciación (-)                                |                      | 46.728.071         | 46.728.071         | 46.728.071         | 46.728.071         | 46.728.071         | 0                  | 0                  |
| <b>Utilidad Antes de Impuestos UAI</b>          |                      | <b>175.796.329</b> | <b>190.543.202</b> | <b>173.381.871</b> | <b>182.205.589</b> | <b>189.552.866</b> | <b>242.941.465</b> | <b>251.305.714</b> |
| Impuestos (35%) (-)                             |                      | 61.528.715         | 66.690.121         | 60.683.655         | 63.771.956         | 66.343.503         | 85.029.513         | 87.957.000         |
| <b>Utilidad Despues de Impuestos UDI</b>        |                      | <b>114.267.614</b> | <b>123.853.081</b> | <b>112.698.216</b> | <b>118.433.633</b> | <b>123.209.363</b> | <b>157.911.952</b> | <b>163.348.714</b> |
| Depreciación (+)                                |                      | 46.728.071         | 46.728.071         | 46.728.071         | 46.728.071         | 46.728.071         | 0                  | 0                  |
| Inversión Inicial                               | 233.640.357          |                    |                    |                    |                    |                    |                    |                    |
| Capital de Trabajo Neto operativo CTNO          |                      | 4.535.959          | 4.926.505          | 5.359.545          | 5.840.296          | 6.374.683          | 6.969.441          | 7.632.235          |
| Variación en CTNO                               | - 4.535.959          | 390.546            | 433.040            | 480.751            | 534.387            | 594.758            | 662.794            | 739.564            |
| Otros Ingresos por ahorro                       |                      | 19.834.060         | 21.039.480         | 18.561.145         | 18.982.989         | 19.171.765         | 19.209.203         | 19.358.135         |
| <b>Flujo De Caja Libre</b>                      | <b>- 238.176.316</b> | <b>180.439.199</b> | <b>191.187.593</b> | <b>177.506.682</b> | <b>183.610.306</b> | <b>188.514.441</b> | <b>176.458.361</b> | <b>181.967.286</b> |
|                                                 | Año 8<br>(2031)      | Año 9<br>(2032)    | Año 10<br>(2033)   | Año 11<br>(2034)   | Año 12<br>(2035)   | Año 13<br>(2036)   | Año 14<br>(2037)   | Año 15 (2038)      |
| Energía generada kwh                            | 463.220              | 463.220            | 463.220            | 463.220            | 463.220            | 463.220            | 463.220            | 463.220            |
| Proyección Variación anual IPP                  | 9,69%                | 9,87%              | 10,05%             | 10,23%             | 10,41%             | 10,59%             | 10,77%             | 10,95%             |
| Costo Energía (\$/Kwh)                          | 370                  | 373                | 376                | 379                | 382                | 385                | 388                | 391                |
| Porcentaje variación costo energía              |                      |                    |                    |                    |                    |                    |                    |                    |
| Cantidad Abono generada Kg/año                  | 311273               | 311273             | 311273             | 311273             | 311273             | 311273             | 311273             | 311273             |
| Precio Venta Abono (\$/kg)                      | 609                  | 669                | 736                | 812                | 896                | 991                | 1098               | 1218               |
| Ingresos por venta abono                        | 189.585.603          | 208.297.702        | 229.231.622        | 252.682.016        | 278.986.214        | 308.530.854        | 341.759.627        | 379.182.307        |
| Ingresos por venta energía                      | 171.373.357          | 172.702.039        | 174.041.023        | 175.390.388        | 176.750.214        | 178.120.584        | 179.501.578        | 180.893.280        |
| <b>Ingresos Totales</b>                         | <b>360.958.960</b>   | <b>380.999.742</b> | <b>403.272.644</b> | <b>428.072.404</b> | <b>455.736.429</b> | <b>486.651.439</b> | <b>521.261.206</b> | <b>560.075.587</b> |
| Costos Operación y mto                          | 100.461.582          | 110.377.140        | 121.470.043        | 133.896.428        | 147.835.046        | 163.490.777        | 181.098.734        | 200.929.045        |
| <b>EBITDA</b>                                   | <b>260.497.379</b>   | <b>270.622.602</b> | <b>281.802.602</b> | <b>294.175.976</b> | <b>307.901.383</b> | <b>323.160.661</b> | <b>340.162.472</b> | <b>359.146.541</b> |
| Depreciación (-)                                | 0                    | 0                  | 0                  | 0                  | 0                  | 0                  | 0                  | 0                  |
| <b>Utilidad Antes de Impuestos UAI</b>          | <b>260.497.379</b>   | <b>270.622.602</b> | <b>281.802.602</b> | <b>294.175.976</b> | <b>307.901.383</b> | <b>323.160.661</b> | <b>340.162.472</b> | <b>359.146.541</b> |
| Impuestos (35%) (-)                             | 91.174.082           | 94.717.911         | 98.630.911         | 102.961.592        | 107.765.484        | 113.106.231        | 119.056.865        | 125.701.289        |
| <b>Utilidad Despues de Impuestos UDI</b>        | <b>169.323.296</b>   | <b>175.904.691</b> | <b>183.171.691</b> | <b>191.214.385</b> | <b>200.135.899</b> | <b>210.054.430</b> | <b>221.105.607</b> | <b>233.445.252</b> |
| Depreciación (+)                                | 0                    | 0                  | 0                  | 0                  | 0                  | 0                  | 0                  | 0                  |
| Inversión Inicial                               |                      |                    |                    |                    |                    |                    |                    |                    |
| Capital de Trabajo Neto operativo CTNO          | 8.371.798            | 9.198.095          | 10.122.504         | 11.158.036         | 12.319.587         | 13.624.231         | 15.091.561         | 16.744.087         |
| Variación en CTNO                               | - 826.297            | 924.409            | 1.035.532          | 1.161.552          | 1.304.644          | 1.467.330          | 1.652.526          | 1.744.087          |
| Otros Ingresos por ahorro                       | 19.508.221           | 19.659.471         | 19.811.894         | 19.965.499         | 20.120.294         | 20.276.289         | 20.433.494         | 20.591.918         |
| <b>Flujo De Caja Libre</b>                      | <b>188.005.221</b>   | <b>194.639.754</b> | <b>201.948.053</b> | <b>210.018.332</b> | <b>218.951.548</b> | <b>228.863.389</b> | <b>239.886.575</b> | <b>270.781.257</b> |
| <b>Valor Presente Neto VPN</b>                  | <b>743.058.194</b>   |                    |                    |                    |                    |                    |                    |                    |
| <b>Tasa Interna de Retorno TIR</b>              | <b>77,0%</b>         |                    |                    |                    |                    |                    |                    |                    |
| <b>Costo nivelado de energía LCOE (COP/KWh)</b> | <b>279,67</b>        |                    |                    |                    |                    |                    |                    |                    |
| <b>Costo nivelado de energía LCOE (USD/KWh)</b> | <b>0,0747</b>        |                    |                    |                    |                    |                    |                    |                    |

Nota. Elaboración propia.

En los resultados del escenario base se observa un VPN positivo, una TIR superior al WACC. El LCOE se mantiene constante dado a que los factores de inversión y costos de operación y mantenimiento permanecen constantes en ambos escenarios.

#### 4.4. Simulación del Modelo

Una vez proyectados los flujos de caja y calculadas las variables de evaluación para un escenario en el que los parámetros definidos se estiman con el valor más probable, se procede a realizar el análisis de riesgos mediante el simulador Risk 2022. La simulación se realiza para 5000 escenarios, con un nivel de confianza del 95% y un error del 5% del promedio.

##### 4.4.1. Supuestos de Entrada de Simulación Monte Carlo

De acuerdo con lo planteado en la guía del biogás desarrollada por (Porkcolombia, 2020), existen diversos factores del entorno que pueden afectar la digestión. Condiciones como la temperatura, el Ph, la ausencia de oxígeno, la humedad, los tiempos de degradación de materia, la cantidad de agua, sólidos totales y volátiles de los residuos de los porcinos son relevantes para la eficiencia del proceso. Por este motivo, en el modelo de conversión de porquinaza en energía se presentan cuatro variables con un rango de variación el cual se muestra en la Tabla 3. Estas variables se modelan en la simulación como supuestos de entrada y los datos de cada una se ajustan a la distribución triangular.

**Tabla 3.** Supuestos de entrada de simulación Monte Carlo

| Supuestos del Modelo                  | Valor Actual | Rango Variación |
|---------------------------------------|--------------|-----------------|
| Materia seca                          | 7%           | 3% - 16%        |
| Sólidos volátiles                     | 80%          | 75% - 86%       |
| Conversión Biogás (kg SV a lt biogás) | 400 lt       | 300 lt - 700 lt |
| Conversión Energía (m3 biogás a Kwh)  | 0,8175 (36%) | 30% - 43%       |

*Nota.* Elaboración propia.

#### ***4.4.2. Pronósticos de Salida de Simulación Monte Carlo***

Como pronósticos de salida de la simulación en el software se utilizan los mismos indicadores de evaluación del modelo, siendo estos el VPN, la TIR y el LCOE.

## **5. Análisis de Resultados**

Bajo las consideraciones del escenario base del proyecto donde se considera la generación de energía para abastecer el autoconsumo de la granja y vender el excedente al SIN, el proyecto resulta favorable, ya que el VPN es positivo para el negocio, la TIR del 42,1%. Además, el LCOE de 0,0747 USD/KWh resultado de este escenario es competitivo comparado con proyectos internacionales detallados en el informe de IRENA donde se plantean las tendencias del 2021 para proyectos de generación de energía a partir de bioenergía.

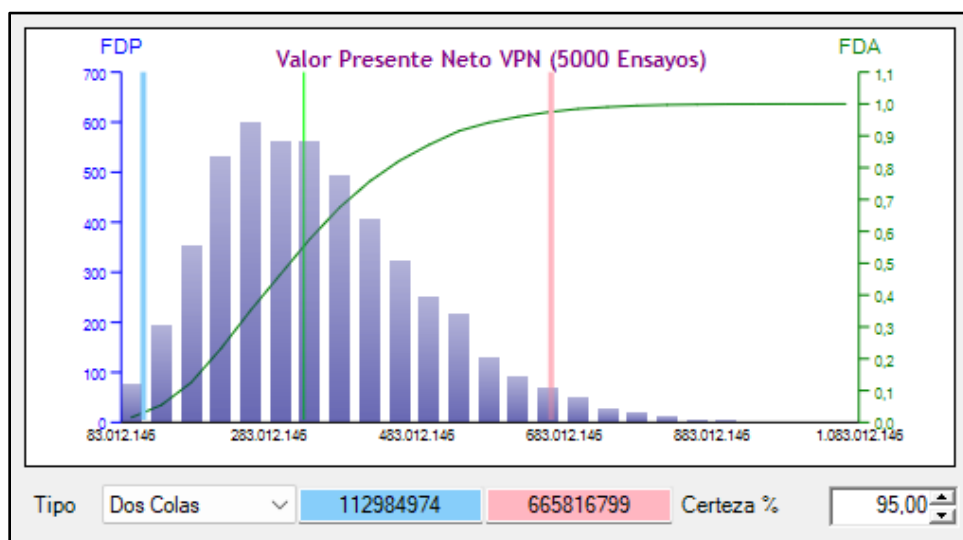
El escenario del proyecto considerando la venta de bioabono como un ingreso adicional representa una mejora en los indicadores de evaluación, se incrementa el VPN en un 254% y se incrementa la TIR en casi 35 puntos porcentuales. El LCOE se mantiene constante dado que este indicador depende de las inversiones, costos y energía generada lo cual mantiene constante en ambos escenarios.

### **5.1. Resultados de Simulación Monte Carlo**

A continuación, se muestran los resultados de la simulación para las variables del modelo presentadas.

En la Figura 8, se presenta la distribución de probabilidad de la simulación para la variable del VPN. Con una probabilidad del 95%, el VPN del proyecto resulta entre 112 millones y 665 millones. La línea verde representa la media de los datos que alcanza un valor de 330 millones. Adicionalmente, dentro de todas las simulaciones, el valor mínimo del VPN fue de 56 millones y el valor máximo de 1064 millones.

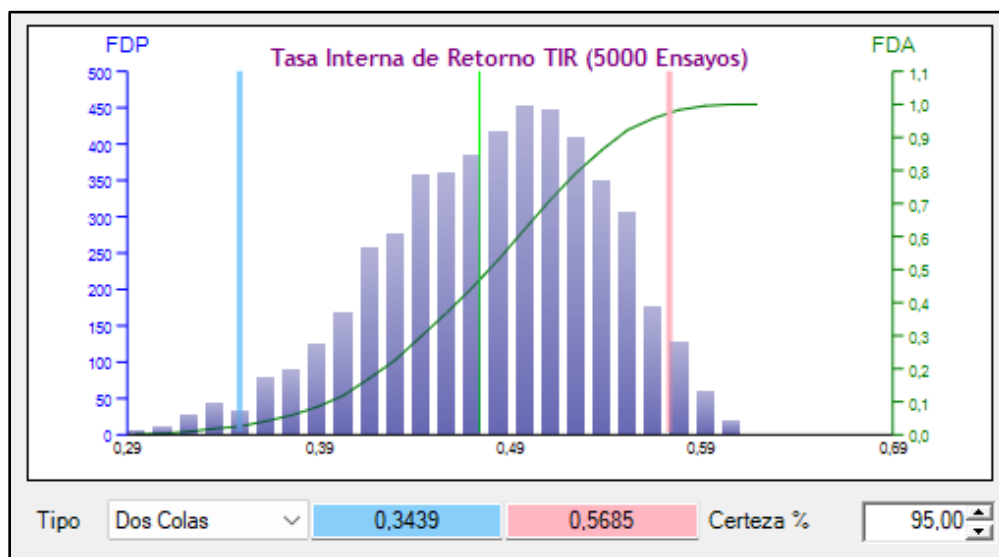
**Figura 8.** Resultado de simulación para el VPN



*Nota.* Elaboración propia.

En la Figura 9, se presenta la distribución de probabilidad de la simulación para la variable de la TIR. Con una probabilidad del 95%, la TIR del proyecto resulta entre el 34% y 56%. La línea verde representa la media de los datos que alcanza un valor de 46%. Adicionalmente, dentro de todas las simulaciones, el valor mínimo y máximo fue de 27% y 61% respectivamente.

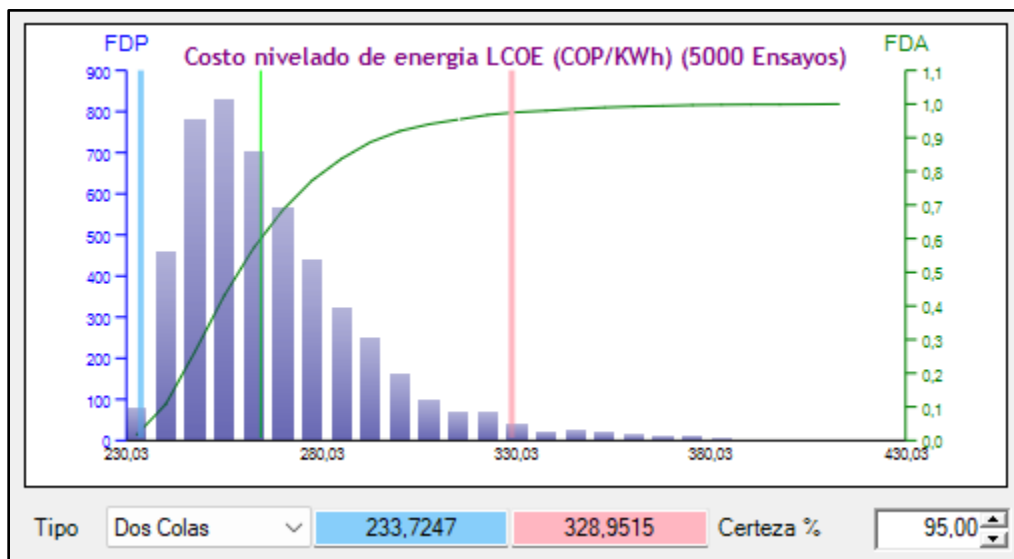
**Figura 9.** Resultado de simulación para la TIR



*Nota.* Elaboración propia.

En la Figura 10, se presenta la distribución de probabilidad de la simulación para la variable del LCOE. Con una certeza del 95%, el LCOE del proyecto resulta entre el 233 pesos y 328 pesos. La línea verde representa la media de los datos que alcanza un valor de 264 pesos. Adicionalmente, dentro de todas las simulaciones, el valor mínimo y máximo fue de 225 pesos y 412 pesos respectivamente.

**Figura 10.** Resultado de simulación para el LCOE



*Nota.* Elaboración propia.

En la Tabla 4, se presentan estadísticas adicionales para cada una de las variables de la simulación.

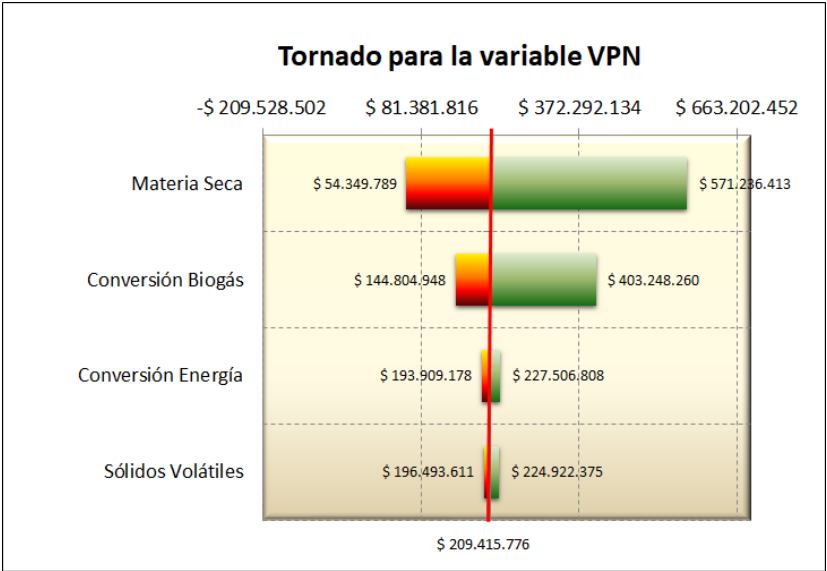
**Tabla 4.** Tabla de estadísticas para las variables simuladas

| <b>Celda</b>                    | <b>Costo nivelado de energía LCOE</b> | <b>Tasa Interna de Retorno TIR</b> | <b>Valor Presente Neto VPN</b> |
|---------------------------------|---------------------------------------|------------------------------------|--------------------------------|
| <b>Número de Pruebas</b>        | 5.000                                 | 5.000                              | 5.000                          |
| <b>Media</b>                    | 264,51                                | 46,9%                              | 330.782.553                    |
| <b>Mediana</b>                  | 258,58                                | 47,5%                              | 310.871.599                    |
| <b>Desviación Estándar</b>      | 24,91                                 | 5,8%                               | 143.017.808                    |
| <b>Variación</b>                | 620,5827                              | 0,0034                             | 20454093293912500              |
| <b>Coeficiente de Variación</b> | 9,42%                                 | 12,46%                             | 43,24%                         |
| <b>Máximo</b>                   | 412,85                                | 61,4%                              | 1.064.911.556                  |
| <b>Mínimo</b>                   | 225,15                                | 27,6%                              | 56.801.279                     |
| <b>Rango</b>                    | 187,69                                | 33,8%                              | 1.008.110.277                  |
| <b>Asimetría</b>                | 1,6136                                | -0,4064                            | 0,7641                         |
| <b>Curtosis</b>                 | 3,8352                                | -0,1861                            | 0,5575                         |
| <b>Percentil 25%</b>            | 247,00                                | 43,0%                              | 223.972.004                    |
| <b>Percentil 75%</b>            | 275,54                                | 51,3%                              | 416.185.864                    |

*Nota.* Elaboración propia.

A continuación, se detallan las gráficas de tornado donde se captura el impacto generado por los supuestos del modelo en cada una de las variables de evaluación del modelo considerando los valores extremos del rango de cada supuesto mientras los demás supuestos permanecen constantes. En La Figura 11, en el eje central se detalla el valor base del VPN del proyecto, y el impacto que genera cada uno de los cuatro supuestos establecidos sobre el mismo. El supuesto de mayor impacto sobre el VPN es el porcentaje de materia seca, luego el factor de conversión de biogás, el factor de conversión de energía y por último el porcentaje de sólidos volátiles. Este comportamiento se presenta debido a que el modelo establecido en la guía de Porkcolombia es escalonado y la materia seca es el primer factor de cálculo.

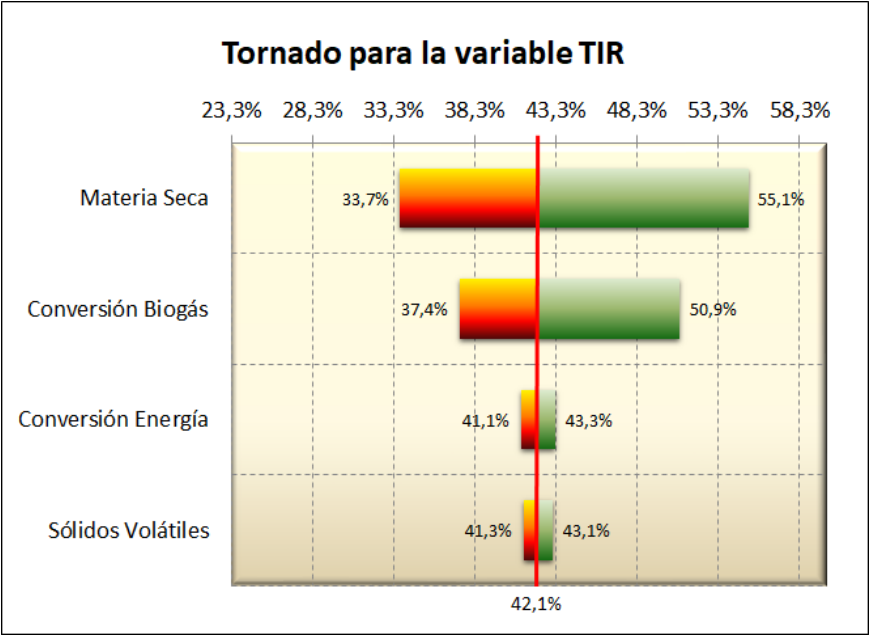
**Figura 11.** Gráfica de tornado para la variable VPN



*Nota.* Elaboración propia.

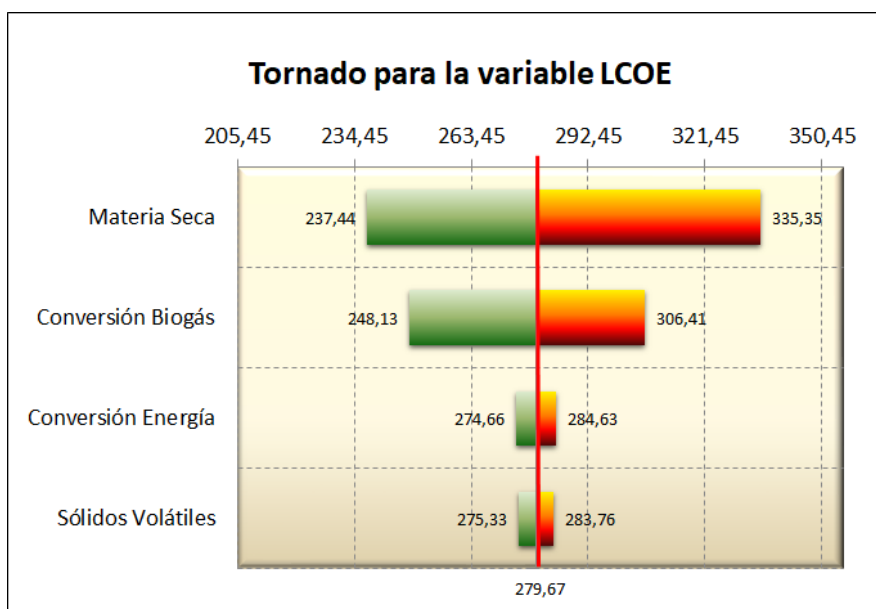
En la Figura 12, se presenta el impacto de los supuestos sobre la TIR del proyecto encontrando que el supuesto de mayor impacto es el porcentaje de materia seca y el de menor impacto el porcentaje de sólidos volátiles al igual que en el caso anterior.

**Figura 12.** Gráfica de tornado para la variable TIR



*Nota.* Elaboración propia.

**Figura 13.** Gráfica de tornado para la variable LCOE



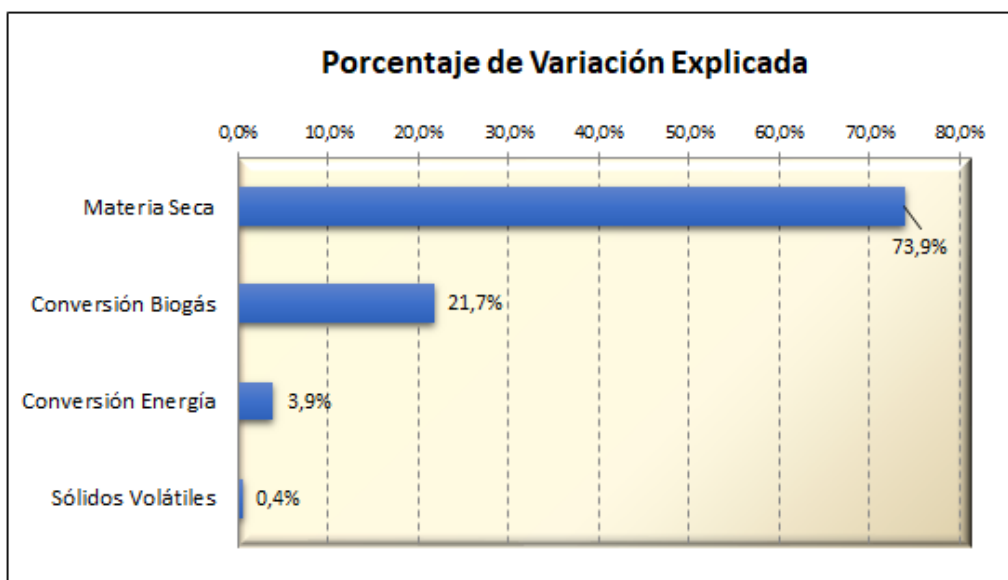
*Nota.* Elaboración propia.

En la Figura 13, se presenta el impacto de los supuestos sobre el LCOE del proyecto encontrando que el supuesto de mayor impacto es el porcentaje de materia seca y el de menor impacto el porcentaje de sólidos volátiles al igual que para las variables anteriores.

## 5.2. Análisis de Sensibilidad

A partir de la simulación realizada en el software, se genera un análisis de sensibilidad en el que se muestra que tanto de la variación en las variables del modelo puede explicarse por la variación en cada uno de los supuestos del modelo en un ambiente dinámico simulado. Al igual que se presentó en las gráficas de tornado, en la Figura 14, se muestra que en el ambiente dinámico de la simulación los cambios en los resultados del modelo son representados en un 73,9% por los cambios en el porcentaje de materia seca, un 21,7% por los cambios en el factor de conversión de biogás, un 3,9% por los cambios en el factor de conversión de energía y un 0,4% por los cambios en el porcentaje de sólidos volátiles.

**Figura 14.** Porcentaje de variación explicada del modelo de simulación



*Nota.* Elaboración propia.

Una vez realizada la simulación para 5000 escenarios considerando los rangos de variación para los parámetros del modelo, en el peor escenario del modelo el VPN resulta positivo con un valor de 56,8 MM, la TIR resulta mayor al WACC con un valor de 27,6% y el LCOE un máximo de 412 \$/Kwh el cual se considera competitivo en comparación a referentes internacionales mostrados en la Figura 5.

## 6. Conclusiones

La información disponible en fuentes secundarias proporcionada por instituciones, gobiernos, estudios experimentales o proyectos ejecutados permitieron estimar los parámetros de conversión para el proyecto de manera teórica siendo el principal referente la guía proporcionada por la agremiación de porcicultores colombianos Porkcolombia.

De acuerdo con los resultados del modelo de simulación bajo los distintos escenarios planteados y el alcance del modelo de conversión establecido, se concluye que es financieramente factible el aprovechamiento energético en granjas porcícolas tecnificadas con una población promedio de 4100 cerdos. La energía generada mediante el aprovechamiento de los residuos del proceso productivo permite cubrir hasta 10 veces la demanda energética de la granja y comercializar el excedente al Sistema Interconectado Nacional. El subproducto generado a partir de la operación del biodigestor representa un potencial de comercialización como materia prima para organizaciones dedicadas a producción de abono orgánico. Así mismo, mediante el análisis de sensibilidad se logró identificar que, dentro de los parámetros de conversión del modelo, la variación del porcentaje de materia seca representa un mayor impacto sobre el resultado del modelo.

Por otra parte, este tipo de iniciativas en la industria porcícola también generan un impacto ambiental positivo, los biodigestores contribuyen al tratamiento correcto de residuos porcícolas evitando la contaminación de suelos y aguas y disminuyendo las emisiones de metano ( $\text{CH}_4$ ) y óxido nitroso ( $\text{N}_2\text{O}$ ) al medio ambiente. El autoabastecimiento de energía también genera un impacto social en la región, aumentando la accesibilidad en zonas rurales y la descentralización energética. Este sistema productivo presenta un enfoque de economía circular aportando al cumplimiento de los objetivos de desarrollo sostenible.

## 7. Referencias Bibliográficas

- Alvarez Montoya, E. R., & Sánchez Giraldo, E. A. (2020). *Generación de energía eléctrica a partir de purines de cerdo para abastecimiento de la granja Cinmex ubicada en el municipio de Santuario, Antioquia*. Medellín.
- Araujo da Silva Junior, J. C., Michaelsen, A. L., Scalvi, M., & Teixeira Gomes Pacheco, M. (2020). Forecast of electric energy generation potential from swine manure in Santa Catarina, Brazil. *Environment, Development and Sustainability*, 22(3), 2305-2319. doi: <https://doi.org/10.1007/s10668-018-0291-z>
- Banco de la Republica. (2023). *Indicador Bancario de Referencia (IBR)*. Recuperado el 15 de enero de 2023, de <https://www.banrep.gov.co/>: <https://www.banrep.gov.co/es/estadisticas/indicador-bancario-referencia-ibr>
- Banco de la república. (2023). *Tasas de captación semanales y mensuales*. Obtenido de [www.banrep.gov.co](https://www.banrep.gov.co/): <https://www.banrep.gov.co/es/estadisticas/tasas-captacion-semanales-y-mensuales>
- Bancolombia. (2023). *Crédito Finagro*. Obtenido de [www.bancolombia.com](https://www.bancolombia.com/): <https://www.bancolombia.com/personas/creditos/negocios/finagro>
- Barrera Cardoso, E. L., Alba, Y., López González, L., Pedraza Garciga, J., & Álvarez Guerra Plasencia, M. A. (2020). Impacto de la producción de biogás en la matriz energética de la granja porcina Guayos. *Universidad y Sociedad*, 12(5), 254-262. Obtenido de [http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S2218-36202020000500254](http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2218-36202020000500254)
- Bhatt, A. H., & Tao, L. (2020). Economic Perspectives of Biogas Production via Anaerobic Digestion. In *Bioengineering*, Vol. 7(Issue 3). doi: <https://doi.org/10.3390/bioengineering7030074>
- Bueno López, M., Rodríguez Sarmiento, L. C., & Rodríguez Sánchez, P. J. (2016). Análisis de costos de la generación de energía eléctrica mediante fuentes renovables en el sistema eléctrico colombiano. *Ingeniería y Desarrollo*, 34(2), 397-419. Obtenido de <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=85246475008>
- Castro, L., Escalante, H., Jaimes Estévez, J., Díaz, L. J., Vecino, K., Rojas, G., & Mantilla, L. (2017). Monitoreo de digestores de bajo costo en condiciones reales: uso rural de biogás y calidad del digestato. *Tecnología bioambiental*, 311-317.
- Comisión Económica Para América Latina y el Caribe (CEPAL). (2019). *Objetivos De Desarrollo Sostenible (ODS)*. Recuperado el 7 de noviembre de 2022, de <https://www.cepal.org/es>: <https://www.cepal.org/es/temas/agenda-2030-desarrollo-sostenible/objetivos-desarrollo-sostenible-ods>

- Comisión Mundial sobre el Medio Ambiente y el Desarrollo. (1987). *Nuestro Futuro Común*.  
Obtenido de [https://www.ecominga.uqam.ca/PDF/BIBLIOGRAPHIE/GUIDE\\_Lecture\\_1/CMMAD-Informe-Comision-Brundtland-sobre-Medio-Ambiente-Desarrollo.pdf](https://www.ecominga.uqam.ca/PDF/BIBLIOGRAPHIE/GUIDE_Lecture_1/CMMAD-Informe-Comision-Brundtland-sobre-Medio-Ambiente-Desarrollo.pdf)
- Córdova, M. H., de Castro e Silva, H. L., Barros, R. M., Lora, E. S., dos Santos, I. S., de Freitas, J. R., . . . Flauzino, B. K. (2021). Analysis of viable biogas production from anaerobic digestion of swine manure with the magnetite powder addition. *Environmental Technology & Innovation*. doi: <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.eti.2021.102207>
- Corficolombiana. (7 de Octubre de 2022). *La rentabilidad esperada del capital propio en Latinoamérica*. Obtenido de [www.investigaciones.corficolombiana.com](https://www.investigaciones.corficolombiana.com): [https://investigaciones.corficolombiana.com/finanzas-corporativas/decisiones-de-inversiones-y-rentabilidad/la-rentabilidad-esperada-del-capital-propio-en-latinoamerica/informe\\_1218912](https://investigaciones.corficolombiana.com/finanzas-corporativas/decisiones-de-inversiones-y-rentabilidad/la-rentabilidad-esperada-del-capital-propio-en-latinoamerica/informe_1218912)
- Corredor, G. (2018). Colombia y la transición energética. *Ciencia Política*, 13(25), 107-125.
- DANE. (20 de septiembre de 2020). *Encuesta Nacional Agropecuaria (ENA)*. Recuperado el 10 de mayo de 2022, de <https://www.dane.gov.co/>: <https://www.dane.gov.co/index.php/estadisticas-por-tema/agropecuario/encuesta-nacional-agropecuaria-ena#anexos>
- DANE. (2023). *Índice de Precios del Productor (IPP)*. Recuperado el 15 de enero de 2023, de <https://www.dane.gov.co/>: <https://www.dane.gov.co/index.php/estadisticas-por-tema/precios-y-costos/indice-de-precios-del-productor-ipp>
- Dennelly, C., Lawlor, P. G., Gardiner, G. E., Jiang, Y., Shalloo, L., & Zhan, X. (2017). Stochastic modeling of the economic viability of on-farm co-digestion of pig manure and food waste in Ireland. *Applied Energy*, 205, 1528-1537. doi: <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.08.101>
- Derivex. (04 de abril de 2022). *Información y mercados: Precios de cierre de electricidad*. Obtenido de [www.derivex.com.co](http://www.derivex.com.co): <https://www.derivex.com.co/categoriadoc/8-precios-de-cierre>
- Di Fraia, S., Fabozzi, S., Macaluso, A., & Vanoli, L. (2020). Energy potential of residual biomass from agro-industry in a Mediterranean region of southern Italy (Campania). *Journal of Cleaner Production*, 277. doi: <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.124085>
- FINAGRO. (2022). *Portafolio de servicios 2022*. Recuperado el 15 de enero de 2023, de <https://www.finagro.com.co/>: [https://www.finagro.com.co/sites/default/files/basic-page/2022-06/Portafolio\\_De\\_Servicios\\_10.pdf](https://www.finagro.com.co/sites/default/files/basic-page/2022-06/Portafolio_De_Servicios_10.pdf)
- Florez García, B. M. (2021). *Desarrollo de aplicación en Excel para la estimación del potencial de producción de metano*. Obtenido de [www.repositorio.uniandes.edu.co](http://www.repositorio.uniandes.edu.co):

<https://repositorio.uniandes.edu.co/bitstream/handle/1992/55264/25941.pdf?sequence=1>

- Galán Riveros, X. F. (2016). *Potencial energético de la biomasa residual agrícola en Colombia*. Obtenido de <https://repositorio.uamerica.edu.co/bitstream/20.500.11839/637/1/5101477-2016-2-GA.pdf>
- Gámez Ávila, C., Lozano Triana, M., Cervera González, C. A., & Quintero Jaramillo, J. A. (2022). Producción de biogás a partir de procesos de digestión y codigestión anaerobia usando estiércol de cerdo y residuos vegetales. *RedBioLAC*, 6(1), 34-39. Obtenido de <http://www.revistaredbiolac.org/index.php/revistaredbiolac/article/view/25/15>
- Garfí, M., Castro, L., Montero, N., Escalanteb, H., & Ferrer, I. (2019). Evaluación de los beneficios ambientales de los digestores de biogás de bajo costo en fincas de pequeña escala en Colombia: una evaluación del ciclo de vida. *Tecnología Bioambiental*, 274, 541-548.
- González Rubio, C. H. (2016). *Estudio de prefactibilidad para la generación de energía a partir de biomasa residual en granjas de cerdo de una industria porcícola*. Cali.
- Gutiérrez mantilla, D., & Bernal Ochoa, J. G. (2020). *Análisis del ciclo de vida para el proceso de producción porcina en una granja ubicada en San Antonio del Tequendama*. Cundinamarca. Obtenido de [https://ciencia.lasalle.edu.co/ing\\_ambiental\\_sanitaria/1842](https://ciencia.lasalle.edu.co/ing_ambiental_sanitaria/1842)
- Instituto Colombiano Agropecuario ICA. (2022). *Censo Pecuario nacional ICA*. Obtenido de [www.agronet.gov.co/estadistica/Paginas/home.aspx?cod=124](http://www.agronet.gov.co/estadistica/Paginas/home.aspx?cod=124)
- IRENA. (2022). *Costos de generación de energías renovables en 2021*. Obtenido de [https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2022/Jul/IRENA\\_Power\\_Gen\\_Costs\\_2021\\_Summary\\_ES.pdf?rev=2ac802f758ae4c3fa87d60e4cb430d14](https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2022/Jul/IRENA_Power_Gen_Costs_2021_Summary_ES.pdf?rev=2ac802f758ae4c3fa87d60e4cb430d14)
- ISE. (June de 2021). *Levelized cost of electricity renewable energy technologies study*. Obtenido de [https://www.ise.fraunhofer.de/content/dam/ise/en/documents/publications/studies/EN2013\\_Fraunhofer-ISE\\_LCOE\\_Renewable\\_Energy\\_Technologies\\_version%20Nov2013\\_EN\\_Stand\\_13-04-16\\_v02.pdf](https://www.ise.fraunhofer.de/content/dam/ise/en/documents/publications/studies/EN2013_Fraunhofer-ISE_LCOE_Renewable_Energy_Technologies_version%20Nov2013_EN_Stand_13-04-16_v02.pdf)
- Laviola de Oliveira, A. C., Fernandes, O. R., Renato, N. d., & Borges, A. C. (2021). Feasibility of using different renewable energy sources in Brazilian swine farmings. *Journal of Cleaner Production*. doi: <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.130040>

- León, E., & Martín, M. (2016). Optimal Production of power in a combined cycle from manure based biogas. *Energy Conversion and Management*, 114, 89-99.
- Ministerio de Minas y Energía. (25 de marzo de 2021). *Transición energética: un legado para el presente y el futuro de Colombia*. Obtenido de <https://www.conte.org.co/>: <https://www.conte.org.co/libro-transicion-energetica-un-legado-para-el-presente-y-el-futuro-de-colombia/>
- Porkcolombia. (2020). *Guía de biogás para el sector porcícola colombiano*. Obtenido de <https://porkcolombia.co/>: <https://porkcolombia.co/guia-de-biogas-para-el-sector-porcicola-colombiano/>
- Rahman, K. M., Woodard, R., Manzanares, E., & Harder, M. K. (2014). An assessment of anaerobic digestion capacity in Bangladesh. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 32, 762-769. doi: <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.01.026>
- REN21. (2022). *Renewables 2022 Global Estatus Report*. Recuperado el 20 de mayo de 2022, de <https://www.ren21.net/>: [https://www.ren21.net/wp-content/uploads/2019/05/GSR2022\\_Full\\_Report.pdf](https://www.ren21.net/wp-content/uploads/2019/05/GSR2022_Full_Report.pdf)
- Rodríguez, A., & Morales, L. (2017). *Estimación del Potencial Eléctrico del Biogás Obtenido de Biomasa Residual Bovina y Porcina en ZNI de Colombia*. Obtenido de [www.repositorio.udistrital.edu.co](http://www.repositorio.udistrital.edu.co/): <https://repositorio.udistrital.edu.co/handle/11349/7377>
- Ruiz Plazas, L. M., & Gómez Aguilar, Á. S. (2020). *Prototipo de generador de energía eléctrica a partir del biogás (excretas porcinas de la granja Agroindustria Tecnológica del Llano - AGROTEC SAS)*. Obtenido de [www.repositorio.ean.edu.co](http://www.repositorio.ean.edu.co/): <http://repositorio.uan.edu.co/bitstream/123456789/3000/1/2020LinaMar%C3%ADaRuizPlazas.pdf>
- UNAL. (febrero de 2018). *Estimación del potencial de conversión a biogás de la biomasa en Colombia y su aprovechamiento*. Obtenido de <https://bdigital.upme.gov.co/>: <https://bdigital.upme.gov.co/bitstream/handle/001/1317/Informe%20final.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Unidad de Planeación Minero Energética UPME. (2015). *Integración de las energías renovables no convencionales en Colombia*. Bogotá: La imprenta Editores S.A.
- Universidad Distrital Francisco José de Caldas. (2020). *Biomasa en la Región Central*. Obtenido de [www.regioncentralrape.gov.co](http://www.regioncentralrape.gov.co/): <https://regioncentralrape.gov.co/wp-content/uploads/2020/05/Cptl06-BIOMASA-EN-LA-REGIO%CC%81N-CENTRAL.pdf>
- Venegas Venegas, J. A., Deb, R. A., & Pinto Ruíz, R. (2019). Biogás, la energía renovable para el desarrollo de granjas porcícolas en el estado de Chiapas. *Análisis económico*, 34(85), 169-197. Obtenido de

[https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S2448-66552019000100169](https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2448-66552019000100169)

- Villacrés Jirón, M. A. (2016). *Evaluación del potencial de biomasa residual del ganado porcino para el aprovechamiento energético en la Granja Porcina García en el Cantón La Maná, barrio Miraflores sector el Toquillal en el año 2016*. Obtenido de [www.repositorio.utc.edu.ec](http://www.repositorio.utc.edu.ec):  
<http://repositorio.utc.edu.ec/bitstream/27000/6068/1/MUTC-000438.pdf>
- Yeh, S. C., Chen, J. C., & Chen, Y. L. (2010). Feasibility Analysis of Utilizing Swine Manure as an Energy Source in Southwest Taiwan. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Enviromental Effects*, 33(3), 229-243. doi: <https://doi.org/10.1080/15567030903078038>