

# **Determinación de redes regionales para la instalación de plantas centralizadas de biogás a partir de los residuos agroindustriales generados en el departamento de Cundinamarca**

## **Determination of regional networks for the installation of centralized producing plants of biogas from the agro-industrial residues generated in Cundinamarca's department**

### **Determinação de redes regionais para a instalação de plantas centralizou os produtores de biogás a partir dos resíduos agro-industriais gerados no departamento de Cundinamarca**

Karen Tatiana Montenegro Orozco<sup>1</sup>; Ana Sofía Rojas Carpio<sup>1\*</sup>; Iván Cabeza Rojas<sup>1</sup>; Mario Andrés Hernández Pardo<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Facultad de Ingeniería Ambiental. Universidad Santo Tomás (USTA), Carrera 9 No. 51-11, Bogotá, Colombia

<sup>2</sup>Ingeniería Ambiental. Universidad EAN, Calle 79 No. 11-45, Bogotá, Colombia

**Resumen:** La determinación de áreas aptas para la ubicación de plantas centralizadas de biogás en el departamento de Cundinamarca, se estableció mediante la identificación de una red logística y de las variables a incluir en dicha red, como lo son disponibilidad de sustratos, potencial de metano producido, precio por adquisición del sustrato, costos asociados al transporte, corrientes residuales generadas y viabilidad económica del proceso; para la selección de la ubicación de una planta centralizada fue necesario el desarrollo de metodologías como el proceso analítico jerárquico (AHP), mediante la cual se logró obtener como resultado el mejor escenario para desarrollar este proyecto, involucrando las variables a tener en cuenta para el diseño de una planta generadora de biogás, para seleccionar la ubicación de este tipo de proyectos, se le asignó a cada una de las variable necesarias en el diseño de una planta centralizada de biogás un valor de significancia, teniendo en cuenta la jerarquización y valorización dada a cada variable por personas que han desarrollado proyectos relacionados con procesos de co-digestión anaerobia, con el fin de evaluar la viabilidad técnica, ambiental y económica de este tipo de proyectos. Para la determinación de las zonas aptas para la instalación de una planta centralizada de biogás se realizó un ajuste a la disponibilidad de sustratos y al potencial de biometanización, por medio de una recopilación y procesamiento de información suministrada por entidades municipales y regionales, las cuales brindaron información y datos relacionados con la gestión de los residuos agroindustriales generados en el departamento; por otra parte el ajuste del potencial se realizó teniendo en cuenta los procesos de co-digestión anaerobia, donde al realizar la mezcla de los sustratos el potencial de biometanización de estos podrá aumentar o disminuir teniendo en cuenta las características físico químicas de los mismos, por esta razón el nuevo potencial se calculó relacionando el porcentaje de mezcla del sustrato con su potencial de metano individual, incluyendo un factor de corrección, el cual se calculó para cada sustrato base en cada una de las mezclas de sustratos a tratar, con el fin de tener una mayor precisión en el valor del potencial calculado. Posterior a la realización del ajuste, en este artículo se proponen tres zonas aptas para la instalación de plantas productoras de biogás, las cuales presentan una alternativa para la valorización de los residuos agroindustriales que se generan en cada una de las regiones seleccionadas, resaltando el mejor escenario para la ubicación de una planta centralizada de biogás en el departamento.

*Palabras claves: Biomasa, co-digestión anaerobia, jerarquización, potencial de metano, red logística.*

**Abstract:** The determination of suitable areas for the location of centralized biogas in the department of Cundinamarca plants, was established by identifying a logistics network and variables to be included in the network, as are availability of substrates, potential methane, substrate acquisition price, costs associated with transport, waste streams generated and economic viability of the process; for selecting the location of a

centralized plant it was necessary to develop methodologies and analytic hierarchy process (AHP), by which it was possible to obtain results in the best scenario to develop this project, involving the variables to be considered for the design of a generating biogas plant, to select the location of these projects, was assigned to each of the necessary in the design of a centralized biogas plant worth significant variable, taking into account the hierarchy and valuation given each variable by people who have developed projects related to processes of anaerobic co-digestion, in order to assess the technical, environmental and economic feasibility of such projects. To determine areas suitable for the installation of a centralized biogas plant adjustment to the availability of substrates and the potential for biogas production was carried out by a collection and processing of information provided by municipal and regional authorities, which provided information and data related to the management of agro-industrial waste generated in the department; otherwise the adjustment potential was made taking into account the processes of anaerobic co-digestion, where when mixing substrates potential biomethanisation of these may increase or decrease taking into account the physical and chemical characteristics of the same, Therefore the new potential was calculated by relating the percentage of substrate mixture with potential individual methane, including a correction factor, which was calculated for each substrate based on each substrate mixtures to be treated, in order to have greater accuracy in the calculated value potential. After making the adjustment, in this article, three areas suitable for the installation of plants producing biogas are proposed, which have an alternative for the recovery of agro-industrial waste generated in each of the selected regions, highlighting the best stage for the location of a centralized biogas plant in the department.

*Keywords: Biomass, co anaerobic digestion, nesting, potential methane, logistics network.*

**Resumo:** A determinação dos sítios apropriados para a localização do biogás centralizado no Departamento de plantas Cundinamarca, foi estabelecida através da identificação de uma rede de logística e variáveis a serem incluídas na rede, como são a disponibilidade de substratos, potencial metano, substrato preço de aquisição, custos associados ao transporte, fluxos de resíduos gerados ea viabilidade económica do processo; para seleccionar a localização de uma planta centralizada, foi necessário desenvolver metodologias e análise hierárquica (AHP), pelo qual foi possível a obtenção de resultados no melhor cenário para desenvolver este projeto, envolvendo as variáveis a serem consideradas para o projeto de uma usina de biogás gerar, para seleccionar a localização destes projectos, foi atribuído a cada um dos necessários no projeto de uma usina de biogás centralizada variável significativa valor, tendo em conta a hierarquia e valorização dada cada variável por pessoas que desenvolveram projetos relacionados a processos de co-digestão anaeróbia, a fim de avaliar a viabilidade técnica, ambiental e económica de tais projetos. Para determinar as áreas adequadas para a instalação de um ajuste de unidade de biogás centralizada para a disponibilidade dos substratos e do potencial de produção de biogás foi realizado por uma recolha e tratamento de informações fornecidas pelas autoridades municipais e regionais, que forneceu informações e dados relacionados com a gestão de resíduos agro-industriais gerados no departamento; caso contrário, o potencial de ajuste foi feita tendo em conta os processos de co-digestão anaeróbica, onde quando a mistura de substratos biometanização potencial destes pode aumentar ou diminuir, tendo em conta as características físicas e químicas do mesmo, por conseguinte, o novo potencial foi calculada comparando a percentagem de mistura de substrato com potencial metano indivíduo, incluindo um factor de correcção, o qual foi calculado para cada substrato com base em cada composição do substrato a ser tratado, a fim de tem uma maior precisão no potencial valor calculado. Depois de fazer o ajuste, neste artigo, três sítios apropriados para a instalação de centrais produtoras de biogás são propostas, que têm uma alternativa para a valorização de resíduos agro-industriais gerados em cada uma das regiões seleccionadas, destacando o melhor palco para a localização de uma unidade de biogás centralizada no departamento.

Palavras-chave: biomassa, co-digestão anaeróbia, aninhamento, metano potencial, rede logística.

## Introducción

El departamento de Cundinamarca se caracteriza por tener un gran desarrollo de actividades agropecuarias, contando con 246.106 Ha cosechadas [1], por ende la generación residuos provenientes del desarrollo de cultivos transitorios y permanentes es elevada, de los cuales se producen tallos, hojas, cáscaras, ramas, entre otros. al no realizarse una gestión adecuada de los residuos generados por actividades agropecuarias podrá generar diferentes impactos como aumento de nitrógeno en los suelos, aportado principalmente por el estiércol porcino, que a su vez ocasiona efectos tóxicos, y otros efectos a largo plazo como infertilidad de suelos,

contaminación de aguas freáticas y problemas fitotóxicos [2,3]. Como se reporta en el informe realizado por la Gobernación de Cundinamarca y el Instituto Distrital de Gestión del Riesgo y Cambio Climático (IDIGER) [4], la opción más económica para agricultores es la quema de dichos residuos, generando una importante fuente neta de emisiones de gases de efecto invernadero, como material particulado, dióxido de nitrógeno, monóxido de carbono, dióxido de azufre y dioxinas, debido a la presencia de plaguicidas adsorbidos a la superficie de hojas y tallos [5,6].

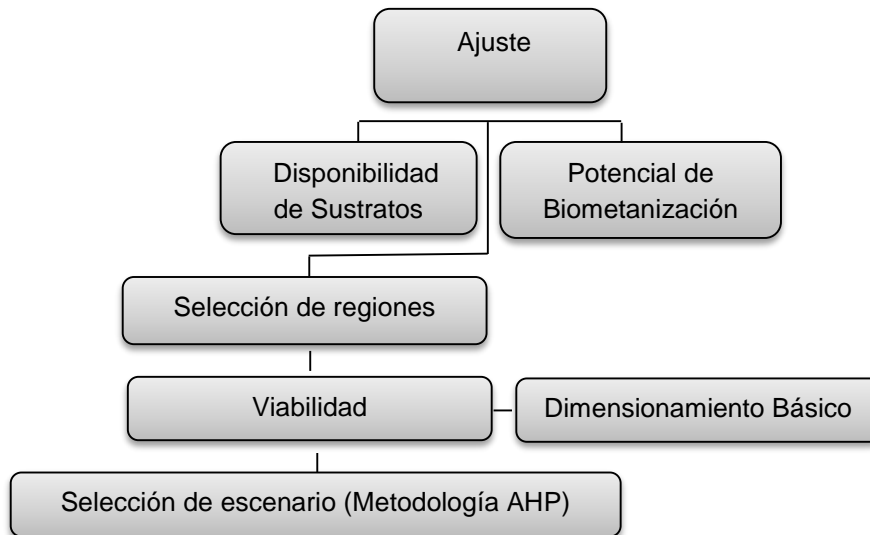
Debido a ello es indispensable la búsqueda de soluciones globales y de carácter integrador, con implicación de todas las partes afectadas, como es el caso de agricultores, ganaderos, entidades públicas encargadas de la gestión de los residuos agroindustriales, universidades y centros de investigación, a fin de poder ofrecer soluciones adecuadas para la valorización de estos residuos, teniendo en cuenta las condiciones de producción, minimizando los impactos generados, por medio de la mejora de prácticas del manejo de dichos residuos. Algunas de las soluciones presentadas tanto a nivel nacional e internacional involucran el desarrollo de herramientas gratuitas, las cuales facilitan la evaluación de la factibilidad del empleo de digestores de biogás, como lo son SmallBIOGAS [7], relevamiento Unificado INTA INTI 2010 [8], el modelo de evaluación de biogás de Iowa [9] y a nivel nacional se encuentra el programa Landfill Methane Outreach (LMOP) [10]; estas herramientas brindan una visión global acerca de la viabilidad económica para el montaje de una planta de biogás que aprovecha los residuos agroindustriales y residuos sólidos urbanos, como se presenta en el programa Landfill Methane Outreach, el cual está diseñado para el estudio de generación de biogás en vertederos, dichas herramientas presentan al usuario una serie de términos difíciles de entender, lo que dificulta su uso. Los modelos mencionados anteriormente dan apertura a la aplicación de herramientas tecnológicas de fácil acceso para la evaluación del potencial de biogás producido a partir de los residuos agroindustriales, las cuales no se desarrollan a gran escala en el país. El desarrollo de este tipo de modelos y herramientas facilitará el acceso y aprovechamiento de la información disponible para la generación de condiciones óptimas de biogás, siendo esta una alternativa viable, la cual integra los actores involucrados en la adecuada gestión de residuos agroindustriales.

Durante la evaluación de la factibilidad y viabilidad técnica, económica y ambiental del desarrollo de plantas de biogás se presentan una serie de retos asociados a la identificación del adecuado diseño de sistemas logísticos para la biomasa dedicada a la energía, por ello cada sistema a ser implementado requiere un enfoque personalizado, el cual se adapte a los requisitos y limitaciones del área a trabajar [11]. Los principales retos para la implantación de plantas de biogás se encuentran relacionados con la creciente demanda de biomasa, así como sus diversas fuentes y orígenes, siendo el principal problema la determinación de la ubicación y la identificación de variables a tener en cuenta para el diseño e instalación de dicha tecnología. La ubicación y las variables a involucrar en la red logística de este tipo de proyectos podrán ser determinadas a partir de metodologías que apoyen a la toma de decisiones como es el caso del proceso analítico jerárquico (AHP) [12,13,14].

La instalación de plantas centralizadas de biogás que valorizan residuos agroindustriales por medio de procesos de co-digestión anaerobia, ofrecen una nueva oportunidad para el tratamiento de cualquier tipo de residuo biodegradable o desechos orgánicos, principalmente residuos agroindustriales, por lo tanto, la co-digestión anaerobia no sólo es útil en términos de gestión de residuos, sino también un medio de producción de energía renovable. Por ello el objetivo principal de este artículo es brindar una opción para la gestión y valorización de los residuos agroindustriales generados en el departamento de Cundinamarca, evaluando diferentes parámetros determinantes para la aplicación de este tipo de tecnologías.

## **1. Materiales y métodos**

La determinación de la viabilidad para la instalación de plantas centralizadas de biogás en diferentes regiones del departamento de Cundinamarca se realizó mediante cinco acercamientos principales (Figura 1), los cuales fueron ajuste del potencial de biometanización por municipio, selección de regiones, determinación de la ubicación de dicha tecnología en el departamento de Cundinamarca y la viabilidad para el desarrollo de este tipo de tecnologías; esto con el fin de presentar el mejor escenario para la ubicación de una planta centralizada de biogás en el departamento de Cundinamarca.



**Figura 1.** Esquema metodología

La selección del mejor escenario para la ubicación de una planta de biogás, se definió mediante la aplicación del proceso analítico Jerárquico (AHP), como apoyo para la toma de decisiones, como se mencionó anteriormente en el primer acercamiento se realizó un ajuste a la disponibilidad de los sustratos y al potencial de producción de metano, este se realizó a partir de la información suministrada por entidades públicas municipales y departamentales, el segundo ajuste se determinó teniendo en cuenta las proporciones de los sustratos a mezclar y su respectivo potencial de metano, relacionando el aumento o disminución del potencial de mezcla, teniendo en cuenta las características de los sustratos a tratar por medio de procesos de co-digestión anaerobia. La selección de las tres regiones aptas para la instalación de plantas centralizadas de biogás se realizó integrando las variables que se deben tener en cuenta en la red logística de una planta de biogás, donde se tomó como base el municipio que mayor potencial presentara, teniendo en cuenta el ajuste realizado previamente a la disponibilidad y al potencial de biometanización. Para la determinación de la viabilidad al momento de instalar una planta centralizada productora de biogás en cada una de las regiones presentadas, se realizó un dimensionamiento básico de las plantas y de la relación entre ingresos (venta de energía y digestato producido durante el proceso) y egresos (costos asociados a mantenimiento, operación, transporte y financieros), para el desarrollo del último acercamiento se empleó la metodología AHP, con el objetivo de seleccionar el mejor escenario o región para la instalación de una planta productora de biogás en el departamento de Cundinamarca.

### 1.1. Ajuste a la disponibilidad del sustrato

El ajuste a la disponibilidad de los sustratos en el departamento se realizó por medio de la recopilación de información, verificación de resultados y evaluación de disponibilidad de biomasa, dicha información se obtuvo de entidades como la Gobernación de Cundinamarca en la subdirección de planeación y desarrollo rural, quienes facilitaron los resultados de la Encuesta Nacional agropecuaria (2014) [15], con el objetivo de verificar la información suministrada en la Encuesta Nacional agropecuaria (2013), tomando los cambios ocurridos en el desarrollo de actividades agrícolas en el año 2014 [1] y actualizar toda la información relacionada con los cultivos transitorios y permanentes encontrados en el departamento. Posterior a ello se contactó a las UMATAS municipales, para así poder discriminar la cantidad de residuos que actualmente son aprovechados gracias a los programas de pos cosecha y de aprovechamiento que realizan los municipios. Otro parámetro a tener en cuenta para la realización del ajuste de disponibilidad de sustratos se encuentra relacionado con los requerimientos sanitarios para las granjas tecnificadas encargadas de la crianza de especies bovinas, porcinas, avícolas, los cuales junto a los programas establecidos para la valorización de dichos residuos apoyaron el cálculo de la cantidad de estiércol generado en el departamento, esta información se obtuvo a partir de los datos suministrados por la federación nacional de avicultores de Colombia (FENAVI), federación colombiana de ganaderos (FEDEGAN) y la asociación Colombiana de porcicultores (FNP) [16,17,18].

## 1.2. Potencial de biometanización

Para el ajuste del potencial de biometanización (BMP) se tuvo en cuenta el potencial de metano teórico obtenido mediante procesos de co-digestión anaerobia de algunos sustratos, dichos potencial teórico sirvieron como base para el cálculo de un factor de corrección el cual se le aplicara al potencial de biometanización de la mezcla (Ecuación 1) [19]. Para la determinación del factor se tuvo en cuenta el aumento en el BMP al realizar la mezcla de diferentes sustratos a comparación del BMP individual, el factor se halló calculando la desviación estándar de los valores obtenidos de la comparación entre los diferentes potenciales de metano teóricos de las mezclas y el potencial de biometanización (Ecuación 1) calculado para la respectiva mezcla.

$$BMP \text{ de Mezcla} = \left( \sum_{k=1}^n P_j * BMP_j * M_{sv} \right)$$

Dónde:

$$M_{sv} = mt_{sv} * \%sv$$

$M_{sv}$  = Masa solidos Totales

$mt_{sv}$  = Cantidaad de Sustrato

$\%sv$  = Porcentaje de solidos volatiles

$$P_j = \frac{M_{sv}}{\sum M_{svj}}$$

$M_{svj}$  = Masa solidos volatiles en la mezcla

$P_j$  = Participacion

(1)

## 1.3. Regiones de estudio

Para la selección de las regiones aptas para la instalación de centrales para la producción de biogás en el departamento de Cundinamarca, se tuvo en cuenta la mejor alternativa de variables a involucrar en el desarrollo de este tipo de tecnología obtenida del desarrollo del proceso analítico jerárquico (AHP), respetando la jerarquización e importancia de cada variable, es por ello que inicialmente se tomó como referencia el municipio de mayor potencial y con base a ello se tomaron los municipios aledaños que harían parte de cada región, relacionando variables como distribución o disponibilidad de los sustratos y costos asociados a transporte, dichos costos se encuentran directamente relacionadas con la distancia a recorrer [20]. Para el cálculo del potencial de metano por región se calculó empleando la ecuación dos presentada anteriormente a la cual se le aplico el factor obtenido para cada sustrato base, teniendo en cuenta que el sustrato base se seleccionó considerando el residuo que predominan en cada una de las regiones

## 1.4. Viabilidad

Se determina que la viabilidad es el primer acercamiento a un proyecto de inversión, por ende con esta se podrá determinar el éxito o el fracaso de este tipo de proyectos, para ello es necesario determinar la viabilidad económica y técnica, teniendo en cuenta que el desarrollo de dicha viabilidad económica permite evaluar la rentabilidad de este tipo de proyectos, por ende posterior a ello se debe realizar un estudio de pre factibilidad y factibilidad. La determinación de la viabilidad se encuentra directamente relacionada con el tamaño de la planta y factores que puedan incidir en el funcionamiento de esta, para ello se especificó el tamaño de los componentes básicos de la planta, con ello se puede hacer una estimación del coste de inversión y una relación entre los costos e ingresos de la planta [21].

### 1.4.1. Dimensionamiento de la planta

El dimensionamiento básico de las plantas de biogás para cada una de las regiones de estudio está dado por los componentes principales del digestor que son volumen del digestor, potencia generada y producción de energía. El volumen de digestor (Ecuación 2) [19] se encuentra directamente relacionado con el volumen de residuos a tratar y el tiempo de retención hidráulica (TRH) el cual es 30 días para procesos mesofílicos [22]; la potencia generada (Ecuación 3) [19] está dada por la producción de metano y el poder calorífico inferior del metano (PCI), en cuanto a la potencial producida efectiva se tiene que es solo del 35% [23] y a su vez la energía producida (Ecuación 4) [19] depende de la potencia generada.

$$Volumen Digestor (m^3) = \left( \frac{Volumen de Sustratos \left( \frac{m^3}{año} \right)}{365} \right) * TRH \quad (2)$$

$$Potencia (kW) = Prod Metano \left( \frac{m^3 CH_4}{año} \right) * PCI \left( \frac{kcal}{m^3} \right) * 4.18 \frac{kJ}{kcal} * \frac{1}{365} * 24 * 60 * 60 \left( \frac{año}{seg} \right) \quad (3)$$

$$Energía producida \left( \frac{kW}{año} \right) = Potencia (kW) * 365 * \frac{24 horas}{días} \quad (4)$$

#### 1.4.2. Viabilidad Económica

La viabilidad económica del desarrollo de este tipo de proyectos se determinó mediante el resultado obtenido del balance financiero entre los ingresos por la venta de digestato, venta de energía producida y los egresos que se encuentran relacionados con los costos de mantenimiento, de operación y los asociados al transporte de los sustratos, los egresos mencionados se calcularon a partir de la inversión (Ecuación 5) que se requerirá para la instalación de la planta en cada una de las regiones de estudio [24], se debe considerar que la implementación de plantas centralizadas de biogás como un modelo de negocio pretende maximizar los ingresos minimizando la inversión, pero es importante considerar que el análisis de viabilidad económica de este tipo de proyectos no se puede plantear bajo un estricto esquema de negocios si no en un esquema de estrategia y oportunidad ya que se debe garantizar la participación en mercados de energía no convencional [21].

$$Inversión = Inversion de referencia * \left( \frac{Capacidad de referencia (kW)}{Capacidad a instalar (kW)} \right)^{0.6} \quad (5)$$

Para obtener el resultado de la inversión total de la planta a instalar en cada región se tuvo en cuenta la capacidad que cada una de estas presentaría de acuerdo al dimensionamiento, se tomó como inversión de \$ 5.000 millones para una planta con capacidad de 500 kW [25].

Los costos de operación son aquellos que se encuentran relacionados con el funcionamiento de los equipos de la planta y pago de mano de obra requerido, en el cual se tuvo en cuenta un factor de 1.66 % [25] el cual se multiplica por la inversión, este factor involucra el salario a pagar a cada empleado multiplicado por el factor prestacional para Colombia del 1,8% del salario ( Decreto 1045 de 1978) [25]. Los costos de mantenimiento se calcularon en función a la inversión (Ecuación 6) [24], siendo  $F_m$  el factor para evaluar dichos costos, los cuales dependen de la tecnología a utilizar, donde este es del 15% ya que para garantizar el adecuado funcionamiento de la planta se utilizarán materiales anticorrosivos, que deberán tener una frecuencia mayor de mantenimiento.

$$Costos de mantenimiento = Inversion * F_m \quad (6)$$

Para la determinación de los costos asociados al transporte de los sustratos, se tuvo en cuenta los datos obtenidos a través del software suministrado por el Ministerio de Transporte [26] para el cálculo del costo de referencia para la negociación de carga en carretera, de acuerdo al tipo de vehículo a utilizar, distancia recorrida. Los costos financieros hacen referencia al dinero que se dejó de recibir por realizar la inversión del proyecto, para su cálculo se tuvo en cuenta la tasa de rendimiento mínima atractiva para Colombia, la cual es fijada por el banco de la república para grandes accionistas y es del 25% [27], para la obtención de los costos financieros se multiplicó la inversión de cada planta por dicha tasa.

En cuanto a los ingresos como se mencionó anteriormente están dados por la venta de energía, la cual en el país es de \$ 165,12 kW/hora [28] y por la venta del digestato, que corresponde al 25% del total de los residuos a tratar, presentado un valor comercial de \$200/kg [25].

### 1.5. Proceso Analítico Jerárquico (AHP)

El modelo propuesto para la evaluación de las variables incluidas en la red logística de la instalación de una planta de biogás, deberá tener en cuenta estudios de los diferentes actores involucrados, criterios a trabajar, e integración de conocimientos de expertos en el tema, con el fin de cuantificar y jerarquizar las variables principales a tener en cuenta en este tipo de proyectos. Para formalizar esta etapa, se utilizó el método del Proceso Analítico Jerárquico (AHP), que hace posible resolver los problemas de decisión complejos, en donde se utilizó una estructura jerárquica de varios niveles, constituidos a partir de un objetivo, problema, criterios o alternativas evaluadas, para posteriormente realizar una comparación, para así determinar el grado de importancia de cada variable y finalmente dar prioridad a las alternativas propuestas [13,29,30].

Las partes que componen la metodología (AHP) son:

a) Descomposición del problema: En esta sección se determinó el problema el cual fue la determinación del mejor escenario (Región) para la ubicación de una planta centralizada de generación de biogás, donde se tuvo en cuenta el objetivo esperado, criterios de evaluación y las posibles escenarios, y variables a involucrar en una red logística las cuales fueron organizadas en orden descendente, con el fin de crear una estructura con tres niveles jerárquicos.

b) Comparación por Pares: Se realizaron dos encuestas a seis expertos en el área los cuales determinaron según su criterio la importancia de las variables (Tabla 1), donde se realizó una matriz unificando los valores dados por cada experto, calculando así el peso de cada variable por medio del cálculo de la media geométrica de los datos obtenidos en las encuestas [13].

**Tabla 1.** Base de escala implementada

Importancia, Intensidad	Definición
1	La misma importancia
3	Importancia moderada
5	Importancia fuerte
7	Importancia fuerte demostrada
9	Importancia extrema
2,4,6,8	Los valores intermedios

c) Definición de la importancia de los criterios variables: A partir de la información recopilada en la etapa anterior se sintetizó en las matrices de doble entrada para calcular el peso relativo de cada variable. Previo a la determinación de dicho peso se normalizó la matriz de comparación anterior; la normalización se realiza dividiendo cada valor de la variable por el total del valor de la columna correspondiente. Finalmente, para la determinación del peso relativo de variables se determinó el auto vector de cada una de las variables, el cual muestra el peso relativo entre cada una de estas, obtenido de forma aproximada calculando la media aritmética de cada variable a tratar.

d) La consistencia de los juicios: Este está dado por el cálculo del índice de coherencia, el cual establece que si excede 0.1 se presentaría problema de incompatibilidad en los datos. El índice de inconsistencia se basa en el máximo autovalor o Máximo Eigenvalue, que se calcula sumando el producto de cada elemento del vector por el total de la columna correspondiente de la matriz de comparación original, posterior al cálculo de Maximum Eigenvalue o Máximo autovalor se obtiene el índice de inconsistencia ( Ecuación 7) [13]. Donde  $n$  es el número de variables.

$$IC = \frac{\text{Maximum Eigenvalue} - n}{n - 1} \quad (7)$$

e) Priorización de escenarios: Una vez calculada la importancia de las variables se validó y evaluó los diferentes escenarios propuestos. Por lo tanto, se obtuvo la priorización de los escenarios (regiones), tomando en consideración la importancia relativa de cada variable, con ello se evaluó cuál de las tres regiones representa una mejor alternativa para la ubicación de una palta centralizada de biogás. Para ello, con cada escenario propuesto (último nivel de la jerarquía) se plantea una matriz de juicios por comparación pareada entre escenarios, donde se establece el nivel de prioridad de un escenario sobre otro tomando como base el peso de cada variable, para ello se calculó el vector de pesos locales de escenarios (Ecuación 8) ello se debe realizar para cada una de las variables, lo cual permite relacionar las variables con cada uno de los escenarios planteados, finalmente para determinar cuál escenario es el más conveniente para la solución del problema planteado se realiza la suma de los vectores de pesos locales de escenario obtenido para cada variable y se obtiene la priorización de escenarios [31].

$$P_{re} = \frac{V_{med} - V_{max}}{D_v}$$

Donde:

	$P_{rv}$ = Peso relativo por escenario
	$P_v$ = Peso relativo de las variables
	$V_{med}$ = Valor intermedio entre comparación de escenarios
	$V_{max}$ = Valor máximo entre comparación de escenarios
	$V_{min}$ = Valor mínimo entre comparación de escenarios
	$D_v$ = Diferencia entre valores

$$Dv = \frac{V_{max} - V_{min}}{P_v}$$

## 2. Resultados y discusión

### 2.1. Ajuste a la disponibilidad del sustrato

Para el ajuste al potencial de metano a partir de biomasa residual, establecido anteriormente para el departamento de Cundinamarca, se tomó la nueva disponibilidad de los sustratos a tratar, con base a la información suministrada por la Encuesta Nacional agropecuaria (2014). En donde se encontró que municipios como la Vega, Sasaima, Villa Pinzón y Ubala actualmente no cuentan con los cultivos presentados en la encuesta del año anterior (2013), como cacao y plátano; en La Vega cacao, banano y plátano; en Sasaima, Villa Pinzón y Ubala papa y cultivos transitorios [15], debido a los impactos generados por el fenómeno del Niño en las actividades agrícolas y a los cambios del uso del suelo los cuales están relacionados con la expansión urbana. De acuerdo a la información brindada por las UMATAS municipales se obtuvo que varios de los municipios no cuentan con información actualizada y otras en el momento no tienen funcionarios a cargo, lo que dificultó la adquisición de información.

Al contactar a las UMATAS se obtuvo que en la mayoría de municipios los pequeños productores hacen uso de sus residuos para ser utilizados como compostaje, como es el caso de Fuquene, Guatavita, La Calera, Manta, Soacha, Sibate y Villa Gómez presentándose un aprovechamiento menor a comparación del resto de municipios (Tabla 5). Por otra parte en municipios como Choachi y Subachoque se realiza un mayor aprovechamiento de sus residuos agroindustriales con un aprovechamiento del 60% (Tabla 2) debido a que la empresa prestadora del servicio de aseo en los municipios creó una ruta destinada a la recolección de este tipo de residuos, la cual tiene una cobertura del 70% en el municipio y sus alrededores, lo que facilita su posterior aprovechamiento como compostaje, este modelo también ha sido implementado en otros municipios pero con algunas limitaciones como Cabrera, Funza, Girardot, Guayabetal, Une, Villeta, Viota y Zipacon; los cuales no cuentan con una buena cobertura en el servicio de recolección, por ende la porción de residuos que se pueden aprovechar es menor, siendo aproximadamente del 30% al 40% (Tabla 4), cabe resaltar que la mayoría de los sustratos aprovechados son procedentes de actividades agrícolas.

Adicional a ello municipios como Suesca, se encuentran vinculados al programa realizado por Asocolflor llamado Flor Verde, en el cual se recolecta un alto porcentaje de los residuos generados en actividades de



floricultura, para ser utilizado como compostaje, por ende, se excluyó al municipio debido a que se tiene proyectado que se recolecte el 100% de los residuos orgánicos provenientes de dicha actividad.

**Tabla 2.** Aprovechamiento de residuos.

Municipio	Disponibilidad de sustratos			
	Compostaje	Lombricultura	Biogás	Otro
Anolaima	NO	NO	10%	NO
Cabrera	30%	NO	NO	NO
Choachi	60%	NO	NO	NO
Facatativa	30%	NO	NO	NO
Funza	40%	NO	5%	NO
Fuquene	10%	NO	NO	SI
Girardot	40%	10%	NO	NO
Guatavita	10%	NO	NO	NO
Guayabetal	30%	NO	NO	NO
La calera	20%	10%	NO	NO
Manta	15%	NO	NO	NO
Subachoque	60%	NO	NO	NO
Sibate	15%	NO	NO	NO
Soacha	10%	NO	NO	NO
Tibirita	NO	NO	12%	NO
Une	40%	NO	NO	NO
Villeta	40%	NO	NO	NO
Villagómez	20%	NO	NO	NO
Viota	30%	NO	NO	NO
Zipacon	30%	NO	NO	NO

El potencial de metano producido por el desarrollo de actividades pecuarias presentó un ajuste aproximadamente del 70%, debido a los requerimientos sanitarios presentados por el Ministerio de Medio Ambiente y las federaciones de los subsectores Bovino (FEDEGAN), Porcino (Asociación Colombiana de Porcicultores) y Avícola (FENAVI), quienes establecen en las Guías Ambientales para estos subsectores los pasos a seguir para la disposición y manejo de excretas producidas en la crianza y levante de las diferentes especies. Como se estipula en el capítulo II del Código Nacional de recursos Naturales (Ley 2811 de 1974), los parámetros de control de la contaminación para actividades rurales incluyendo la eliminación de estiércol, además en la resolución 601 del 2006, se fija los límites máximos para la emisión de sustancias contaminantes y olores, entre los cuales se encuentran el Amoniaco y Ácido Sulfhídrico generado por la descomposición estiércol [3]. Es por ello que para el manejo de excretas de especies bovinas se discriminó el estiércol procedente de machos y hembras criados para producción de carne, ya que no es posible la recolección de dicho residuo, debido a que el ganado de este propósito no se encuentra confinado; para el ajuste del potencial de metano solo se tomó el estiércol producido por las especies destinadas a producción lechera entre los 12 y 24 meses[16]. Para el subsector porcino se discriminaron los animales que se encuentran en granjas tecnificadas, ya que estas granjas utilizan el estiércol producido en planes de fertilización con porquinaza y digestión anaerobia, donde el gas producido es utilizado en lámparas e incubadoras para lechones, como lo establece la Guía Ambiental para el Subsector porcícola, además de ello se discriminó los animales de traspatio debido a la difícil recolección del estiércol producido por dichas especies [17].

Referente al subsector avícola se tomó en cuenta el estiércol producido por especies ponedoras, a causa de los requisitos normativos para el adecuado desarrollo de la avicultura, donde se evidencia que no es posible valorizar el estiércol producido por aves de engorde fuera de las granjas, ya que como lo establece el Código de buenas prácticas avícolas (BPAV) [18], este debe ser tratado in situ posterior al desalojo de los corrales, por requerimientos sanitarios, por ende se debe realizar un tratamiento inmediatamente para posteriormente

ser aprovechado como compostaje, dado que al no realizar este procedimiento se podrán transmitir enfermedades como Listeriosis Encefálica [18].

## 2.2. Ajuste al potencial de biometanización

El ajuste al potencial de biometanización se realizó teniendo en cuenta el potencial teórico de las mezclas debido al proceso de co-digestión anaerobia que se plantea realizar, por ende, el potencial individual de los sustratos se verá afectado por la interacción de los diversos tipos de residuos, al realizar procesos co-digestión se pretende aprovechar la sinergia de las mezclas y compensar las carencias de cada uno de los sustratos por separado [32].

Para el cálculo del nuevo potencial de biometanización de mezcla se calculó un factor de corrección, el cual se halló tomando los diferentes potenciales de metano teóricos encontrados tras una revisión bibliográfica de las mezclas (Tabla 3) comparándolos con el potencial de metano calculado (Ecuación 1). Para el cálculo del factor de corrección se tomó la desviación estándar de los valores obtenidos en la comparación de los potenciales teóricos y los calculados para cada tipo de residuo, donde se obtuvo que el valor de dicho factor es de 1.5 para aquellas mezclas que tenga como sustrato base estiércol, por el contrario al tener como base residuos ricos en azúcares principalmente pulpa de remolacha el factor de corrección aplicado será de 0.4, para residuos hortofrutícolas este es de 1.2, residuos lignocelulosos 0,7 y para residuos vegetales 1.1.

**Tabla 3.** Potencial de metano, co-digestión.

Mezcla	BMP de Mezcla (m <sup>3</sup> /kg)			
	BMP mezcla (m <sup>3</sup> /kg SV)	Sustrato Base	BMP individual (m <sup>3</sup> /kgSV)	Aumento (%)
Excreta de cerdo + Hojas secas + Cachaza + Pulpa de guayaba [33]	30	Excreta de Cerdo	0,40	98,6
Banano +Café + Flores+ Maíz+ Cascarilla de arroz+ Papas + Frutas [34]	0,24	Maíz	0,10	58,3
Estiércol de cerdo+ Fruta [34]	1,45	Residuo de fruta	0,2	54,1
Excremento bovino+ Residuos de poda [34, 35]	34,3	Estiercol Bovino	0,6	88,4
Bagazo de caña + Residuos de café + Residuos de poda [35]	12,78	Residuos de Poda	0,76	94,1
Estiércol+ Residuos Hortofrutícolas [37]	1,97	Residuos de poda	0,2	89,84
Estiércol+ Residuos vegetales [36]	16,01	Residuos vegetales	0,37	97,6
Papa+ Zanahoria+ Tomate+ Excremento de cerdo [37]	0,74	Residuos papa	0,45	39,1
Residuos Hortofrutícolas+ Residuos alto contenido de grasas (papa) [38]	1,601	Residuos papa	0,6	43,4
Ensilado de Maíz+ Excremento especies bovinas [39]	0,767	Ensilado de maíz	0,7	70,1
Residuos Lignocelulosicos + Residuos Hortofrutícolas [36]	1,155	Residuos de fruta	0,42	63,6

Los rendimientos aumentaron gracias al uso de material orgánico con altas concentraciones de materia orgánica fácilmente degradable es decir con mayor proporción de carbohidratos y proteínas como es el caso de los residuos vegetales donde al ser utilizado como sustrato base dicho aumento oscila dentro de un rango del 54.1% y 97.6% (Tabla 3). En contraste a lo que sucede con materiales lignocelulosos que puede presentar problemas para su digestión, debido a la deficiencia en los nutrientes necesarios para el desarrollo de los microorganismos anaerobios, baja alcalinidad o excesivo contenido de sólidos que pueden provocar

problemas mecánicos, donde el aumento del potencial con sustratos base de este tipo fue alrededor de 63.6% [32,39]. Por otra parte el estiércol bovino es una buena opción para ser utilizado como base debido a su alcalinidad, lo que generara una mayor capacidad tampón y aporta una amplia variedad de nutrientes necesarios para el crecimiento de los microorganismos anaerobios, al ser usado como base se presenta un aumento del 88.4%, la mezcla de residuos ganaderos puede mejorar la producción de metano, debido al aporte de sólidos orgánicos y la dilución de algún efecto inhibitorio, que esté presente en la mezcla como amonio [35]. Los residuos provenientes de actividades pecuarias pueden ser mezclados con diferentes tipos de residuos, debido a su excesivo contenido de carbono y nitrógeno, lo que permite obtener una relación C/N optima [41]. En cuanto al potencial de metano con la mezcla de residuos hortofrutícolas con una proporción de 25% de estos y 75% de estiércol bovino, presenta un aumento de 89% teniendo como base un residuo hortofrutícola [21,33].

### 2.3. Regiones de estudio

La evaluación de la producción de bioenergía necesita una perspectiva de sistema de recurso de biomasa, transporte, la ubicación de instalaciones y tecnologías para la valorización de energía, por ello se definieron tres escenarios para la ubicación de una planta centralizada de biogás tomando tres regiones (Figura 2), dichos escenarios se definieron tomando como base los municipios que presentaron un mayor potencial de metano y los municipios que se encuentran a su alrededor con una distancia la cual oscila entre un rango de 10km y 50 km. De acuerdo a esto, el elevado potencial de metano calculado para municipios como Caparrapi para la región uno, San Juan de Rio Seco para la región dos y Ubaque para la región tres, los hizo candidatos para el planteamiento de las regiones alrededor de ellos. La región uno está conformada por los municipios de La Peña, Caparrapi y Guaduas; en la región dos se encuentran los municipios de San Juan Rio Seco, Viani y Quipile; finalmente la región tres está constituida por Choachi, Fomeque y Ubaque.

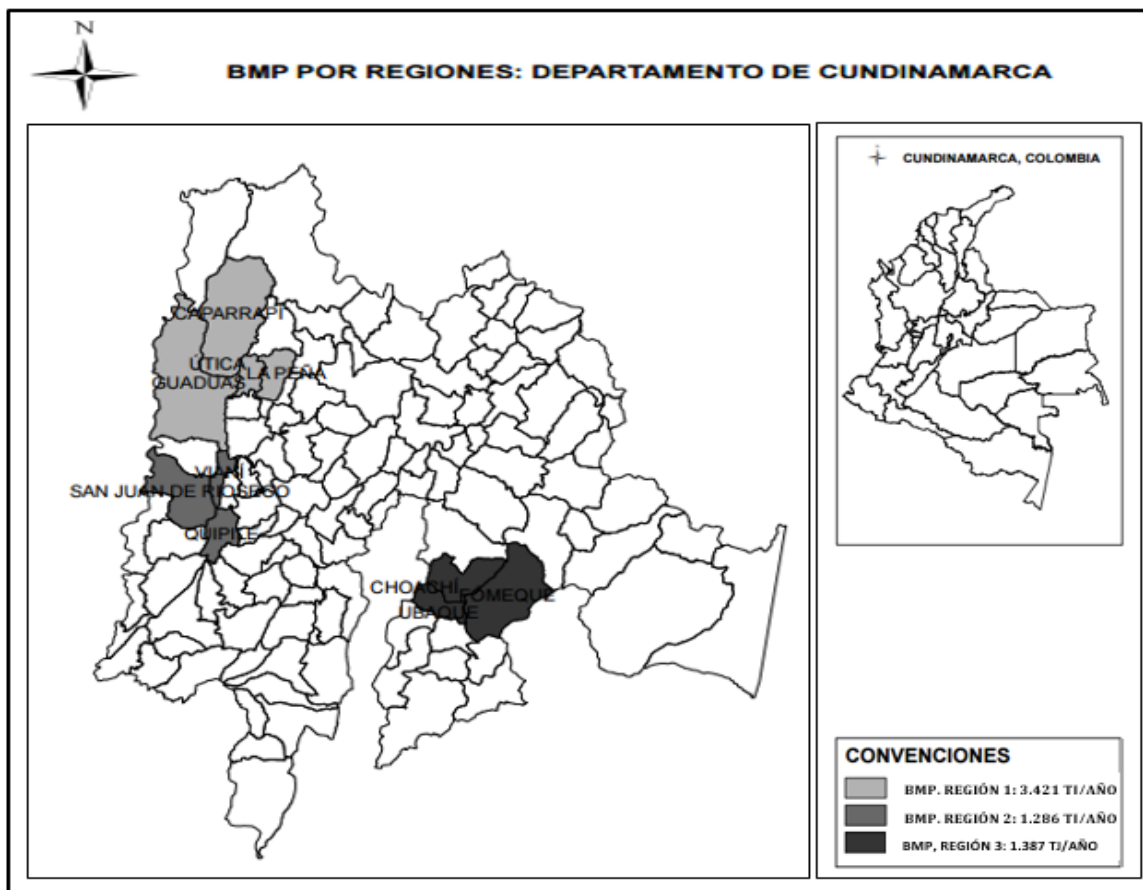


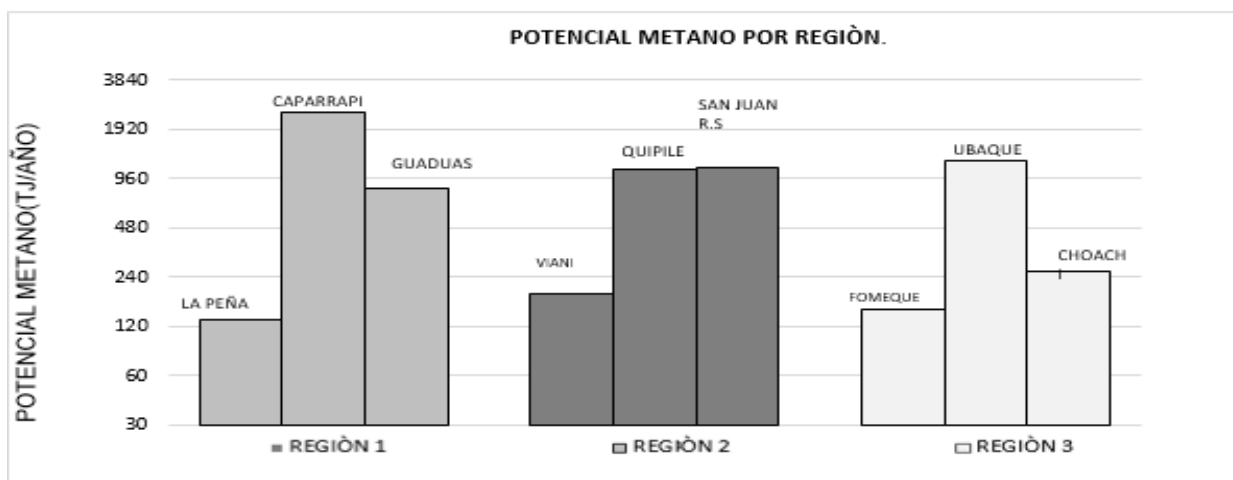
Figura 2. Regiones Caso de estudio.

El mayor potencial de biogás se obtuvo para la región 1 con 3.421 TJ/año (Figura 2). La generación de residuos en la región 1 varía de acuerdo a la disponibilidad y a las épocas de cultivos transitorios como zanahoria, maíz, frijol, habichuela, tomate, arveja, y cultivos permanentes como café, caña panelera, cacao y aguacate, resaltando que el municipio de Caparrapi presenta un alto potencial de biogás, siendo este 409 TJ/año (Figura 3), debido a la elevada generación de residuos provenientes de actividades pecuarias 114,667 t/año, cuyos valores se encuentran entre los rangos de instalaciones implementadas en Alemania, España, Dinamarca y Polonia las cuales utilizan purines de especies bovinas y porcinas utilizando como co-sustratos residuos lignocelulosos provenientes de cultivos de maíz, hojarasca, residuos de industrias de alimentos y residuos de lodo de depuradora, dichas instalaciones tienen en promedio una potencia instalada de 104.179 TJ/año [21].

En resumen, en la región 1 el municipio de Caparrapi es el mayor generador de estiércol bovino lo cual se encuentra relacionado con el alto BMP de esta región, donde se encuentran cultivos permanentes como caña panelera, café, aguacate, cacao y transitorios como maíz, papa, frijol, habichuela; en la región 2 los municipios que mayor aportan potencial de generación de metano son Quipile y San Juan Río Seco destacando cultivos como maíz, tomate, arroz, café, cacao y banano; en la región 3 el municipio que mayor potencial aporta es Ubaque en el cual es posible encontrar cultivos de frijol, ahuyama, arveja, maíz y café, el alto potencial que presenta esta región está dado principalmente por el desarrollo de actividades pecuarias y cultivos transitorios. El potencial de metano por tipo de actividad y residuo en cada central propuesta (Tabla 4).

**Tabla 4.** Potencial de metano por tipo de residuos en cada región.

Actividad	BMP (m <sup>3</sup> /año)		
	Región 1	Región 2	Región 3
Subsector Bovino	1.004.770	266.400	197.585
Subsector Porcino	19.864	13.228	50.282
Subsector Avícola	5.165	10.489	10.067
Agrícola Transitorio	550,2	229,6	211,7
Agrícola Permanente	307.499,6	104,8	122,7



**Figura 3.** Potencial de metano por región.

## 2.4. Viabilidad económica

### 2.4.1. Dimensionamiento de la planta

Se realizó un dimensionamiento básico para las tres regiones mencionadas el cual involucra los componentes principales del digestor, para dicho dimensionamiento se calculó el volumen del digestor, potencia producida y energía generada (Tabla 5).

**Tabla 5.** Dimensionamiento de planta por región.

Variables	Regiones		
	Región 1	Región 2	Región 3
Volumen de Residuos (m <sup>3</sup> )	237.774,9	137.269,2	71.146,3
Volumen del Reactor (m <sup>3</sup> )	19.543	11.282	5.847
Potencia Producida (MW)	63,1	16,8	12,7
Energía Producida (mW/Año)	553,2	147,4	111,7

La generación de residuos y el diseño de cada central propuesta (Tabla 5) es coherente con la participación que se da en las centrales de biogás instaladas en varias regiones del mundo principalmente en Alemania, Eslovenia, Eslovaquia, España, Dinamarca, Japón, Italia, Republica Checa y Suecia, en plantas instaladas en Suecia y España la cantidad de residuos a tratar oscila entre un rango de 39.500 t/año y 80.300 t/año, valorizando principalmente residuos provenientes de la industria alimentaria, actividades porcinas residuos ganaderos y provenientes de actividades agrícolas, dentro de dichas plantas se manejan volúmenes de reactores de mínimo 880 m<sup>3</sup> hasta 8000 m<sup>3</sup>, generándose cerca de 7.646.784 Nm<sup>3</sup>/año de biogás [21]. Las plantas instaladas en países como Alemania, en promedio producen 261.705 kW año, usando digestores de 2420 m<sup>3</sup> y como sustrato ensilado de maíz, residuos de poda y estiércol, por otra parte Austria posee plantas con una capacidad instalada de 10.800.000 kW/año en digestores de 3 x 2.400 m<sup>3</sup>, usando como sustrato residuos de cultivos energéticos, estiércol de ganadería, maíz, residuos de poda, estiércol avícola. Republica Checa, cuenta con plantas con una capacidad de generación de energía de 867.970 kW año, donde es necesario digestores de un volumen bruto de 3 x 2.880 m<sup>3</sup>, usando como sustratos estiércol y ensilado de maíz [41,42].

De acuerdo a los resultados obtenidos (Tabla 5), debido a las grandes dimensionados obtenidas tras el dimensionamiento básico de la planta, especialmente volumen del digestor se recomienda que para cada una regiones se instalen digestores en paralelo, en los cuales se distribuya este volumen, con el fin de poder controlar de manera efectiva los parámetros involucrados en el proceso de obtención de biogás para producción de energía. Para la región 1 se tendrá 4 digestores con un volumen cada uno de 4,885 m<sup>3</sup>, para la región 2 se recomienda instalar 3 digestores de 3.600 m<sup>3</sup> y para la región 3 se establecen 2 digestores de 2.937 m<sup>3</sup>, esta solución es viable ya que cuando se tiene una capacidad de tratamiento mayor como es el caso de las tres regiones de estudio se recomienda dividir este proceso en reactores continuos como se ha realizado en plantas de Alemania, en donde se tiene capacidades superiores a los 18,700 m<sup>3</sup>, para su distribución se utilizan dos digestores de 5.500 m<sup>3</sup>, un digestor de 5.200 m<sup>3</sup> y otro de 2500 m<sup>3</sup> [21,43].

Adicionalmente plantas en Eslovaquia cuentan con digestores con un volumen bruto de 2 x 2.880 m<sup>3</sup>, generando 433.985 kW usando como sustrato estiércol, residuos de poda y ensilado de maíz, Eslovenia tiene plantas con una capacidad de 364.635 kW, donde se utilizan digestores con un volumen de 4.800 m<sup>3</sup> usando como sustrato estiércol avícola, maíz, glicerina y residuos de poda, Japón cuenta con plantas que en promedio generan 9.125 kW, en digestores de 192 m<sup>3</sup> usando como sustrato, residuos orgánicos y de lodo de depuradora provenientes de tratamiento de agua residual, por último Italia con una capacidad instalada de 364.635 kW usando digestores con un volumen bruto de 2 x 2880 m<sup>3</sup>, donde se tratan sustratos como estiércol de ganado, tallos de maíz y residuos de frutas [44].

A partir de lo anterior se evidencia el potencial que tiene el departamento de Cundinamarca para generar energía a partir de los residuos agroindustriales, ya que los valores de energía producida por región se encuentran dentro de los rangos de capacidad instalada de plantas ubicadas en los países anteriormente mencionados, las cuales se encuentran operando en su mayoría desde el 2006.

#### **2.4.2. Viabilidad económica**

Para el estudio económico se determinó que la inversión de este tipo de proyectos oscila entre un rango de ciento sesenta millones de pesos y tres mil billones de pesos, para ello se tomó una inversión de referencia de fue tomada de \$ 5.228.426.833 para el año 2016, con una capacidad instalada de 500 kW [25].

El balance económico realizado para cada una de las regiones del caso de estudio arroja que el desarrollo de este tipo de proyectos no es viable económicamente para los inversionistas [44,45] teniendo en cuenta los diferentes ingresos y egresos (Tabla 6) los cuales fueron calculados a partir de las ecuaciones nombradas en la sección de materiales y métodos.

**Tabla 6.** Ingresos y Egresos por región.

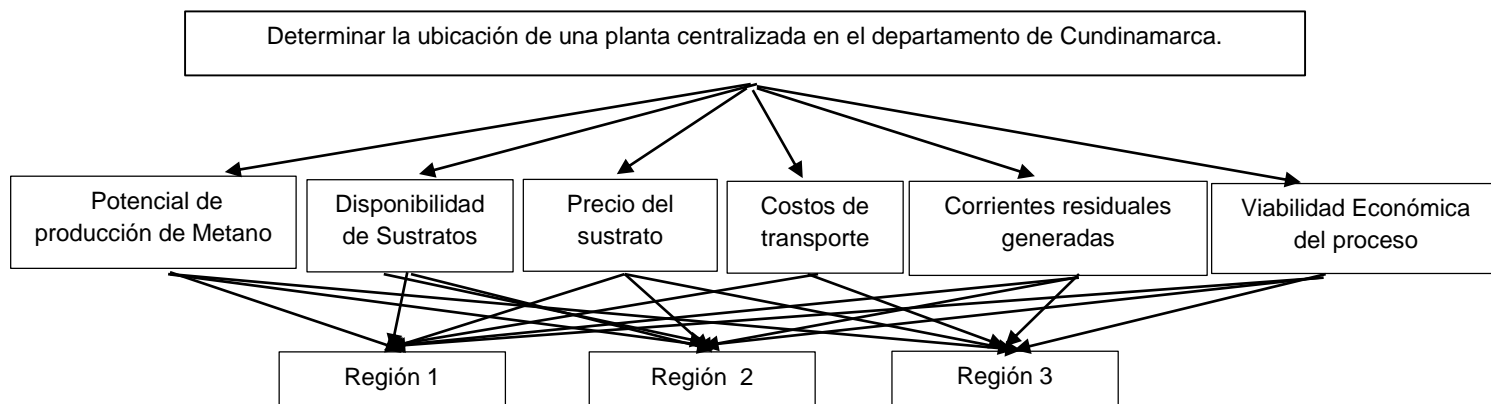
Variables	Ingresos (millones de pesos)			Egresos (millones de pesos)		
	Región 1	Región 2	Región 3	Región 1	Región 2	Región 3
Venta Energía	91.364	24.348	18.450			
Venta Digestato	19.187	6.858	2.979			
Costos de Operación				150.969	71.899	69.877
Costos Mantenimiento				14.300	6.468	5.476
Costos Transporte				628	582	72
Costos Financieros				23.834	10.780	9.127
Total	110.552	31.205	21.430	197,733	89.730	75.553

Al realizar un balance general entre los ingresos y costos se obtuvo que los costos son mayores a los ingresos obtenidos, presentándose que en este primer acercamiento la implementación de estas plantas centralizadas no es viable económicamente ya que las ganancias obtenidas no logran suplir las necesidades del proyecto, esto se ve afectado por diferentes factores que hacen que este no se vea rentable, entre ello se encuentra que en Colombia no existe un mercado específico que establezca una tarifa de venta energía proveniente de fuentes no convencionales a pesar de los incentivos estipulados en la Ley 1715 del 2014, adicionalmente no se cuenta con apoyo a este tipo de proyectos de inversión como si ocurre en países de la Unión Europea, cabe resaltar beneficios como la subvención de un 20 %, otorgamiento de créditos que cubren el 70% de la inversión con tasas de interés del 0% [21,43].

## 2.5. Proceso Analítico Jerárquico (AHP)

### a.) Descomposición del problema

Para la toma de decisiones en la determinación del mejor escenario para la ubicación de una planta de biogás se empleó el proceso analítico jerárquico, donde inicialmente se realizó la descomposición (Figura 4) del problema, para el cual se planteó un objetivo, se establecieron los escenarios que hacen referencia a las regiones, se presentaron las variables a involucrar en el dimensionamiento de una planta de biogás y se establecieron los escenarios que hacen referencia a las regiones en donde se podría ubicar la planta, encontrándose que las variables a involucrar en la red logística para el diseño de una planta centralizada son: Potencial de producción de metano, esta variable se refiere al biogás que se produciría en la planta, la cual a su vez está relacionada con la cantidad y tipo de residuos a tratar; Disponibilidad de sustratos la cual hace alusión a los residuos que son objeto de gestión, es decir aquellos que se pueden transportar recolectar y disponer libremente de ellos ya que no se les realiza ningún tipo de aprovechamiento; Costos de transporte, en esta variable se tienen en cuenta los costos fijos y variables involucrados para el transporte de los sustratos desde el punto de su generación hasta la planta; Precio del sustrato, la cual hace referencia al costo por adquisición de algunos residuos si es necesario; Corrientes residuales generadas, esta variable está relacionada con la producción de digestato, se tomó teniendo en cuenta que es recomendable que el lugar en donde se genere el digestato sea aledaño al lugar de su distribución y aprovechamiento; Viabilidad económica del proceso, se refiere al primer acercamiento que se tiene para determinar el éxito o fracaso de este tipo de proyectos en términos monetarios.



**Figura 4.** Descomposición del problema

b). Comparación por pares.

De acuerdo a los componentes de del proceso (AHP), la matriz de pares (Tabla 7) se obtiene a partir de la relación entre los valores asignados por los expertos a cada variable, dicha matriz presenta la importancia relativa de cada una de ellas, los cuales asignaron un valor de importancia de acuerdo a la escala propuesta presentada (Tabla 1).

**Tabla 7.** Matriz de pares

	Potencial Metano	Disponibilidad Sustrato	Precio del Sustrato	Costos de Transporte	Corrientes Residuales	Viabilidad Económica
Potencial de Metano	1	6/5	4/5	5/4	5/4	7/6
Disponibilidad de Sustratos	5/6	1	6/5	4/6	3/5	7/6
Precio del Sustrato	5/4	3/6	1	4/5	3/5	6/5
Costos Transporte	4/5	5/4	6/4	1	3/4	5/4
Corrientes Residuales	4/5	4/5	5/7	3/5	1	4/5
Viabilidad Económica	6/7	5/6	6/7	4/5	4/5	1
Total	5,54	5,58	6,21	5,12	5,00	6,58

c). Definición de la importancia de los criterios variables

- Normalización de variables: Con el fin de interpretar y dar peso relativo de cada criterio, es necesario normalizar (Tabla 8) la matriz de comparación anterior. La normalización se realiza dividiendo cada valor (Tabla 7) de la variable por el total del valor de la columna.

**Tabla 8.** Normalización matriz de comparación

	Potencial Metano	Disponibilidad Sustrato	Precio del Sustrato	Costos de Transporte	Corrientes Residuales	Viabilidad Económica
Potencial de Metano	0,180	0,154	0,181	0,244	0,167	0,177
Disponibilidad de Sustratos	0,150	0,193	0,181	0,130	0,133	0,177
Precio del Sustrato	0,226	0,096	0,151	0,156	0,133	0,182
Costos Transporte	0,144	0,241	0,227	0,195	0,167	0,190
Corrientes Residuales	0,144	0,154	0,130	0,117	0,222	0,122
Viabilidad Económica	0,155	0,161	0,130	0,156	0,178	0,152

- Peso relativo de cada variable: Posterior a realizar la normalización de los datos presentados en la matriz de comparación de pares (Tabla 8), se calculó el valor del autovector de cada variable, el cual muestra el peso relativo (Tabla 9) entre cada una de las variables, obtenido de forma aproximada calculando la media aritmética de cada variable a tratar con los datos obtenidos de la matriz de comparación de pares (Tabla 7).

**Tabla 9.** Peso relativo de variables

Variable	Auto vector
Potencial de producción de Metano	$\frac{(0,180 + 0,215 + 0,129 + 0,244 + 0,250 + 0,177)}{6} = 0,1992$
Disponibilidad de Sustratos	$\frac{0,150 + 0,179 + 0,193 + 0,130 + 0,120 + 0,177}{6} = 0,1583$
Precio del Sustrato	$\frac{0,226 + ,0,090 + 0,161 + 0,156 + 0,120 + 0,182}{6} = 0,155$
Costos Transporte	$\frac{0,144 + 0,224 + 0,241 + 0,195 + 0,150 + 0,190}{6} = 0,1908$
Corrientes Residuales	$\frac{0,144 + 0,143 + 0,138 + 0,117 + 0,200 + 0,122}{6} = 0,1440$
Viabilidad Económica del proceso	$\frac{0,155 + 0,149 + 0,138 + 0,156 + 0,160 + 0,15}{6} = 0,1516$

d) Consistencia de los juicios

Como se mencionó anteriormente previo al cálculo de consistencia de los datos, se calculó el máximo autovector o Maximum Eigenvalue (Ecuación 8) , el cual es de 5,65. De acuerdo al valor del Maximum Eigenvalue o Máximo autovalor se obtiene que el índice de consistencia (Ecuación 7) es de -0,069. El objetivo de ello es capturar la información suficiente para determinar si los que toman las decisiones han sido consistentes en sus decisiones. De acuerdo al índice de inconsistencia calculado se determinó que los resultados obtenidos al desarrollar a la metodología son consistentes ya que este es menor 0,1.

$$\text{Maximo Eigenvalue} = (5,54 * 0,199) + (5,58 * 0,158) + (6,21 * 0,155) + (5,12 * 0,190) + (5,0 * 0,144) + (6,58 * 0,151) = 5,65 \quad (8)$$

e) Priorización de los escenarios

Para el desarrollo de la matriz de juicios por comparación pareada entre escenarios se calculó el vector de pesos locales (Ecuación 8), para ello se emplearon los datos obtenidos en el caso de estudio para cada una de las variables involucradas en la red logística, teniendo en cuenta que dicha ecuación se empleó para cada una de las variables.

**Tabla 10.** Matriz de juicios entre escenarios.

	Potencial Metano	Disponibilidad Sustrato	Costos de Transporte	Corrientes Residuales	Viabilidad Económica	Peso relativo
Región 1	0,199	0,158	0,000	0,191	0,000	0,548
Región 2	0,161	0,063	0,143	0,046	0,124	0,537
Región 3	0,00	0,000	0,156	0,000	0,144	0,300



De acuerdo a la realización de la metodología AHP para la selección del mejor escenario o región para la ubicación de una planta centralizada se obtuvo que la región que plantea un mejor escenario es la Región 1, ya que al realizar la suma de los vectores de pesos locales de cada variable se obtiene que el peso relativo de esta región (Tabla 10) es el mayor a comparación de las otras regiones propuestas.

Como se observó anteriormente al determinar la viabilidad económica de este tipo de proyectos este primer acercamiento arrojó que la instalación de una planta centralizada de biogás en Cundinamarca no sería viable económicamente, para que al desarrollar proyectos de producción de biogás para la obtención de energía sea viable principalmente en la región 1 en el país se deberá implementar medidas para la integración de las energías renovables al mercado energético, las cuales involucren incentivos referentes a el financiamiento, subsidios, beneficios tributarios [47], adicionalmente se establezca una tarifa especial para venta de energía proveniente de fuentes no convencionales donde se priorice la adquisición de energía inyectada a la red proveniente de energías renovables como ocurre en países de la Unión Europea [21,47].

Por ende se deberán fijar acuerdos asegurando la entrada de materia prima, venta de compost y venta de energía dentro de un régimen especial que garantice la estabilidad y aumento del kWh suministrado por este tipo de fuente no convencional de energía, esto con el fin de asegurar la rentabilidad del proyecto, teniendo en cuenta el valor del kWh establecido en la unión europea de \$523.94 pesos colombianos [47] el nuevo ingreso por venta de energía será de \$ 289.908.834.217 al año, lo cual significa un aumento en el ingreso de \$199.097.218.628 año, adicionalmente se tendrá un ingreso por venta de bonos de carbono de \$ 2.925.641.034,31 año esta operación se encuentra regulada por la Bolsa Mercantil de Colombia, la cual garantizara la venta efectiva de dichos bonos [48]. Por otra parte si se aplicaran los incentivos monetarios a la inversión serian nulos los costos financieros de la planta debido a que para el desarrollo de este tipo de proyectos se otorgarían créditos con tasas de interés del 0%, además de esto se tendría una subvención del 20% de la inversión [21,47] es decir que el valor total que debe cubrir el inversionista sería de \$ 19.067.971.779.

## **Conclusiones**

Posterior a la realización del ajuste al potencial se obtuvo que este potencial disponible para las regiones de estudio es de 5965,919708 TJ/año, 1589,873139 TJ/año, 1204,785939 TJ/año para la región uno, dos y tres respectivamente, encontrándose que los residuos que mayor aporte hacen a este potencial son los generados en actividades pecuarias, como es el caso del municipio de Caparrapi para la región 1 y los tres municipios pertenecientes a la región 3, seguido de los residuos generados por el desarrollo de cultivos permanentes como café, caña panelera y cacao, los cuales predominan en los municipios de la región 1 y región 2. De acuerdo a los resultados obtenidos tras el desarrollo de la metodología AHP se logró identificar que la región más adecuada para la instalación de una planta centralizada de biogás es la región numero 1 ya que a comparación de las otras regiones esta presenta un valor favorable en cuanto a las variables a involucrar en la red logística para este tipo de proyectos, a pesar de ello cada alternativa propuesta en las regiones estudiadas, para la instalación de centrales de biomasa presentan una estrategia la cual se puede incorporar en la gestión integral de residuos generados en el departamento, relacionadas con la clasificación de residuos agroindustriales y valorización de estos, las cuales resultan ser acertadas al momento de ser implementadas en el departamento de Cundinamarca, el cual por sus características y actividades económicas presenta un alto potencial para el desarrollo de tecnologías alternativas como lo es la obtención de energía a partir de biogás, permitiendo aumentar la diversificación de la matriz energética a escala regional. Este trabajo abre numerosas perspectivas de futuro mejorando la precisión en la definición de las alternativas propuestas, haciendo un estudio detallado sobre la posible ubicación de plantas centralizadas de biogás involucrando las diferentes variables a tener en cuenta para su instalación y un estudio económico que involucre los factores que determinan la rentabilidad de este tipo de proyectos.

## **Referencias bibliográficas**

- [1] Gobernacion de Cundinamarca, "Estadísticas agropecuarias," in *Estadísticas de Cundinamarca*,

- Tercera ed., Colombia, 2013, pp. 3–90.
- [2] Consejo de agricultura y alimentacion ecologica de Elikadura (ENNEK), “Compostaje de estiercoles en agricultura ecologica,” Valencia, España, 2010.
- [3] J. Rodriguez, “Impactos y regulaciones ambientales del estiércol generado por los sistemas ganaderos de algunos países de américa,” *Agrociencia*, vol. vol.46, pp. 359–370, 2012.
- [4] Instituto de hidrologia meteorologia y estudios ambientales (IDEAM), “Inventario de emisiones de gases efecto invernadero para la región bogotá – cundinamarca,” Bogota, Colombia, 2012.
- [5] E. Corrales, “Sostenibilidad agropecuaria y sistemas de producción campesinos,” Bogota, Colombia, 2009.
- [6] C. C. Posada, “Política de prevención y control de la contaminación del aire,” Bogota, Colombia, 2010.
- [7] J. Velasquez, “Potencial produccion biogas con diversos sustratos: software de uso publico,” Santiago de Chile, 2015.
- [8] P. Grzegorz, “Green Technologies in Polish Energy Sector - Overview,” *Fundam. Renew. Energy Appl.*, vol. 4, no. 1, pp. 1–11, 2014.
- [9] M. M. Wright, “Iowa Biogas Assessment Model,” Iowa- United States, 2014.
- [10] V. Ludwig, “Manual del Usuario Modelo Colombiano de Biogás,” Phoenix-United States, 2009.
- [11] R. Piplani, N. Pujawan, and S. Ray, “Sustainable supply chain management,” *Int. J. Prod. Econ.*, vol. 111, no. 2, pp. 193–194, Feb. 2008.
- [12] A. Charnes, “Measuring the efficiency of decision making units,” *Eur. J. Oper. Res.*, vol. 2, pp. 429–444, 1978.
- [13] D. Galvez, A. Rakotondranaivo, L. Morel, M. Camargo, and M. Fick, “Reverse logistics network design for a biogas plant: An approach based on MILP optimization and Analytical Hierarchical Process (AHP),” *J. Manuf. Syst.*, vol. 37, pp. 616–623, Oct. 2015.
- [14] S. Lee, W. Kim, Y. M. Kim, and K. J. Oh, “Using AHP to determine intangible priority factors for technology transfer adoption,” *Expert Syst. Appl.*, vol. 39, no. 7, pp. 6388–6395, Jun. 2012.
- [15] sub direccion de desarrollo rural, “Encuesta Nacional Agropecuaria,” Bogota- Colombia, 2014.
- [16] Federacion Colombiana de ganaderos (FEDEGAN), “Guia para la implementacion de buenas practicas ganaderas en sistemas productivos de carne y leche en colombia,” Huila - Colombia, 2011.
- [17] Federacion Colombiana de poricultores, “Guia ambiental pasa el sub sector porcicola,” Bogota- Colombia, 2010.
- [18] Federacion nacional de avicultores de Colombia (FENAVI), “Código Buenas Prácticas Avícolas - BPAV,” Bogota- Colombia, 2011.
- [19] D. Blanco, “Tratamiento biologico aerobio-anaerobio de residuos ganaderos para la obtencion de biogas y compost,” Universidad de Leon, Bogota- Colombia, 2009.
- [20] J. Q. Frota Neto, J. M. Bloemhof-Ruwaard, J. a. E. E. van Nunen, and E. van Heck, “Designing and evaluating sustainable logistics networks,” *Int. J. Prod. Econ.*, vol. 111, no. 2, pp. 195–208, Feb. 2008.
- [21] Agencia andaluza de la energia, “Estudio básico del biogás,” Sevilla-España, 2011.
- [22] V. A. A. Edgar Femando Castillo M., Diego Edison Cristancho, “Estudio de las condiciones de operacion para la digestion anaerobia de residuos solidos urbanos,” *Rev. Colomb. Biotecnol.*, vol. 3, no. 1, pp. 1–22, 2012.
- [23] Universidad Nacional de Colombia, “Motores de combustion interna,” in *Maquinaria para construccion de carreteras*, 5th ed., Medellin-Antioquia, 2010, pp. 1–7.
- [24] M. Peters, K. Timmerhaus, *Plant design and economics for chemical engineers*, 4th ed. Colorado- United States: McGraw-Hill, 1991
- [25] J. Miguel, M. González, C. Alberto, D. Daza, and H. Galeano, “Diseño y estudio económico preliminar de una planta productora de biogas utilizando residuos orgánicos de ganado vacuno Preliminary design and economical study of a biogas production- plant using cow manure,” vol. 27, no. 3, pp. 133–142, 2007.
- [26] Ministerio de transporte, “Calculo costos de referencia de transporte,” 2014. [Online]. Available: [www.mintransporte.gov.co](http://www.mintransporte.gov.co).
- [27] F. Guzman, *Introduccion a la ingenieria economica*, 3rd ed. Bogota- Colombia, 2004.
- [28] L. Guillermo, V. Álvarez, and Eafit, “El precio de la electricidad en Colombia y comparación con referentes internacionales,” Medellin-Antioquia, 2015.
- [29] T. Buchholz, E. Rametsteiner, T. a. Volk, and V. a. Luzadis, “Multi Criteria Analysis for bioenergy systems assessments,” *Energy Policy*, vol. 37, no. 2, pp. 484–495, Feb. 2009.
- [30] S. Ghazinoory, a. Aliahmadi, S. Namdarzangeneh, and S. H. Ghodsypour, “Using AHP and L.P. for choosing the best alternatives based the gap analysis,” *Appl. Math. Comput.*, vol. 184, no. 2, pp. 316–321, Jan. 2007.

- [31] P. Acevedo, "Herramienta de analisis de alternativas de produccion, incorporando el ACV ' cuna a cuna' a los metodos tradicionales," Universidad Industrial de Santander, 2012.
- [32] J. Ma, N. R. Scott, S. D. DeGloria, and A. J. Lembo, "Siting analysis of farm-based centralized anaerobic digester systems for distributed generation using GIS," *Biomass and Bioenergy*, vol. 28, no. 6, pp. 591–600, Jun. 2005.
- [33] M. Guzman, "Estudio de factibilidad de las mezclas de residuos orgánicos para la producción de biogás," *Univ. Cienfuegos*, vol. 3, no. 1, pp. 1–16, 2015.
- [34] O. Chiriboga, "Desarrollo del Proceso de Producción de Biogás y Fertilizante Orgánico a partir de Mezclas de Desechos de Procesadoras de Frutas," Universidad San Francisco de Quito, 2010.
- [35] L. Cendales, "Produccion de biogas mediante la co digestion anaerobica de mezclas de residuos citricos y estiércol bovino para su utilizacion coo fuente de energia renovable," Universidad Nacional de Colombia, 2011.
- [36] R. Carlin, "Evaluación del potencial energético a partir del metano producido por codigestión de residuos de alimentos y estiércol vacuno Evaluación del potencial energético a partir del metano producido por codigestión de residuos de alimentos y estiércol vacuno," Escuela Agrícola Panamericana de Honduras, 2015.
- [37] P. Silva, "Gestión Integral del Tratamiento de Aguas Residuales, tecnologia de biogas," *Ing. y Compet.*, vol. 12, no. 1, pp. 1–19, 2002.
- [38] L. Alzate, "Biodegradación de residuos orgánicos de plazas de mercado," *Rev. Colomb. Biotecnol.*, vol. 6, no. 1, pp. 78–89, 2004.
- [39] M. Rojas, "Estrategias de co digestion: Empleo de biosolidos industriales para la cogeneracion en instalaciones depuradoras convencionales," Universidad Politecnica de Cartagena, 2010.
- [40] A. Lobato, "Estudio de la co digestion anaerobia de residuos ganaderos con otros substratos agro industriales," Universidad de Leon, 2012.
- [41] A. Pazmiño, "Diseño, contruccion e implantacion de un digester anaerobio de flujo continuo para el tratamiento de estiércol bovino," Escuela politecnica del ejercito de Ecuador, 2012.
- [42] Asociación de Productores de Energías Renovables, "Inventario de Plantas de Biomasa, Biogás y Pellests," Madrid-España, 2011.
- [43] Rueckert Naturgas, "Biogasanlage Gaspoltshofen," Lauf an der Pegnitz- Deutschland, 2014.
- [44] B. Pascual, A;Ruiz, "Situacion y potencial de generacion de biogas," Instituto para la diversificacion y ahorro de energia, Madrid-España, 2011.
- [45] Bioenergia presente y futuro del sector de las energias renovables (ACZIA), "Gestion integral de inversion en plantas de biogás," Valencia- España, 2008.
- [46] X. Flotats, "Análisis económico de plantas de biogás," Barcelona-España, 2011.
- [47] Consorcio energetico Corpoema, "formulacion de un plan de desarrollo para las fuentes no convencionales de energia en Colombia (PDFNCE)," Bogota- Colombia, 2010.
- [48] H. García, A. Corredor, L. Calderón, and M. Gómez, "Análisis costo beneficio de energías renovables no convencionales en Colombia," Bogota- Colombia, 2013.