

UNIVERSIDADE FEDERAL DA INTEGRAÇÃO LATINO-AMERICANA
ESPECIALIZAÇÃO EM ENERGIAS RENOVÁVEIS COM ÊNFASE EM BIOGÁS

Jorge Enrique Fonseca Aguirre

EVALUACIÓN DEL POTENCIAL DE PRODUCCIÓN DE BIOGÁS A PARTIR DE
BIOMASA RESIDUAL EN LA REGION DE GIRARDOT, COLOMBIA.

Foz do Iguaçu, PR – Brasil

2013

Jorge Enrique Fonseca Aguirre

EVALUACIÓN DEL POTENCIAL DE PRODUCCIÓN DE BIOGÁS A PARTIR DE
BIOMASA RESIDUAL EN LA REGION DE GIRARDOT, COLOMBIA.

Monografía de Finalización de curso de especialización presentado como requisito para la obtención del título de la Especialización en Energías Renovables con Énfasis en Biogás de la Universidad Federal de Integración Latino-Americana.

Orientador(a): Jocylaine Nunes Maciel

Foz do Iguaçu, PR – Brasil

2013

533.73 Fonseca Aguirre, Jorge Enrique.

F676e

Evaluación del potencial de producción de biogás a partir de biomasa residual en la región de Girardot, Colombia . / Jorge Enrique Fonseca Aguirre. -- Foz do Iguaçu, 2013. 81 f.: il.

Monografia (Especialização em energias renováveis com ênfase em biogás) – Universidade Federal da Integração Latino Americana, Foz do Iguaçu, PR, 2013.

Bibliografia.

Orientador: Profa. Jocylaine Nunes Maciel

1. Biogás. 2. Energia renováveis. I. Título.

AGRADECIMIENTOS

Con unas pocas palabras quiero expresar la gratitud hacia mi familia por todo el apoyo brindado durante mi proceso de formación académica, en especial a mi esposa, mi madre y mis abuelos maternos, porque gracias al apoyo brindado por ellos he alcanzado a las metas propuestas que me permiten tener una enorme satisfacción personal

Igualmente, quiero agradecer al Parque Tecnológico Itaipú de la Universidad Federal de Integración Latinoamericana (UNILA) por permitirme hacer parte del programa de Especialización en Energías Renovables con Énfasis en Biogás, del cual tuve la oportunidad aprender sobre experiencias reales las cuales pueden ser fácilmente implementadas en mi país, así como compartir con profesores y estudiantes con formaciones académicas y experiencias profesionales en diferentes campos acción

Finalmente, quiero hacer un especial reconocimiento a la amabilidad y hospitalidad con la que fui recibido en Brasil durante las visitas realizadas, ☺ Muito Obrigado ☺.

RESUMEN

El biogás ha demostrado ser una fuente alternativa de energía representativa, limpia y confiable el cual puede satisfacer las necesidades de comunidades. Con dicho fin, este trabajo muestra un análisis para determinar la disponibilidad de material orgánico para su aprovechamiento energético a través de producción de biogás la región de Girardot, Cundinamarca, Colombia. El documento ilustra el proceso de producción de biogás, algunas de sus aplicaciones y características y las variables que se deben tener en cuenta para la implementación de una planta de producción. Por otro lado, se presenta información general sobre la ciudad de Girardot, sus condiciones climáticas y el análisis de información de demanda que puede ser atendida con el biogás producido. Así mismo, el documento ilustra el análisis para definir la disponibilidad de materia orgánica residual en la región y la capacidad de producir biogás de cada uno de estos sustratos. Finalmente, el informe cuenta con una sección donde se analizan los resultados de capacidad de producción de biogás en función de cada uno de los residuos orgánicos, así como la comparación entre los volúmenes de gas natural demandados por los sectores residenciales y comerciales de los departamentos de Huila – Tolima y los volúmenes de biogás con capacidad de ser producidos a partir de la biomasa de origen animal y vegetal disponible en la región.

Palabras claves: biogás, metano (CH₄), bio-digestores, disponibilidad de recursos, materia orgánica, digestión anaeróbica, Girardot.

ABREVIATURAS Y SIGLAS

CAR:	Corporación Autónoma Regional
Colciencias:	Departamento Administrativo de Ciencia, Tecnología e Innovación
DANE:	Departamento Administrativo Nacional de Estadística
EU:	Unión Europea
FAO:	Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y Alimentación
FPTI:	Fundación Parque Tecnológico Itaipú
IDEAM:	Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales
IEA:	International Energy Agency - Agencia Internacional de Energía
IGAC:	Instituto Geográfico Agustín Codazzi
MAVDT:	Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial
MME:	Ministerio de Minas y Energía
PSA:	Pressure Swing Adsorption
UIS:	Universidad Industrial de Santander
UN:	Organización de Naciones Unidas
UNILA:	Universidade Federal da Integração Latino-Americana
UPME:	Unidad de Planeación Minero Energética

GLOSARIO

Unidades:

bar	[Presión]	bares
°C	[Temperatura]	Grados centígrados
l	[Volumen]	Litro
m	[Distancia]	Metros
m ²	[Área]	Metros cuadrados
m ³	[Volumen]	Metros cúbicos
mm/m ²	[Precipitación]	Milímetros por metro cuadrado (anual)
MPCD	[Volumen/Tiempo]	Millones de pies cúbicos diarios
Nm ³	[Volumen]	Metros cúbicos normales (Condiciones estándar de presión y temperatura. Solo para gases)
Ton.	[Masa]	Tonelada
W	[Potencia]	Vatios
Wh	[Energía]	Vatios hora
Wh/l	[Energía/Volumen]	Densidad energética – Vatios hora por litro
Wh/m ³	[Energía/Volumen]	Densidad energética – Vatios hora por metro cubico

Prefijos:

G	[Giga]:	10 ⁹
M	[Mega]:	10 ⁶
k	[Kilo]:	10 ³
h	[hecto]	10 ²

c	[centi]	10^{-2}
m	[mili]	10^{-3}
μ	[micro]	10^{-6}
n	[nano]	10^{-9}

Otros:

pH:	Indicador de nivel de acidez/alcalinidad de una sustancia
E85:	Combustible con un contenido volumétrico del 85% de etanol
<i>V_b</i> :	Volumen de biogás
<i>M_s</i> :	Masa total de sustrato por año
<i>C_s</i> :	Capacidad de generación de biogás del sustrato por año

CONTENIDO

AGRADECIMIENTOS	4
RESUMEN	5
ABREVIATURAS Y SIGLAS	6
GLOSARIO.....	7
1 INTRODUCCIÓN.....	16
1.1 HIPÓTESIS	17
1.2 JUSTIFICACION	17
2 OBJETIVOS.....	18
3 METODOLOGIA	19
4 BIOGÁS Y SU PROCESO DE PRODUCCIÓN	20
4.1 Variables involucradas en el proceso de producción de biogás	21
4.2 Tipo de bio-digestores.....	23
4.3 Características del biogás.....	25
4.3.1 Contenido energético del biogás	26
4.4 Manipulación y usos del biogás	27
4.4.1 Enriquecimiento de biogás	27
4.4.2 Almacenamiento:.....	29
4.4.3 Distribución.....	30
4.4.4 Aprovechamiento energético.....	31
4.4.5 Combustible para transporte	33
4.5 Subproductos del biogás.....	35
5 GIRARDOT, COLOMBIA.....	36
5.1 Caracterización climática de Girardot	39

5.2	Demanda de gas natural en la región	41
6	DISPONIBILIDAD DE MATERIAL ORGÁNICO CON POTENCIAL PARA GENERAR BIOGÁS EN LA REGIÓN DEL MUNICIPIO DE GIRARDOT	44
6.1	Metodología	44
6.2	Atlas del Potencial Energético de la Biomasa Residual en Colombia	45
6.3	Inventario de material orgánico disponible en la región.....	46
6.3.1	Material orgánico de origen animal (estiércol únicamente).....	46
6.3.2	Material orgánico de origen vegetal	48
7	CARACTERIZACIÓN DE LA MATERIA ORGÁNICA PARA LA PRODUCCIÓN DE BIOGÁS.....	51
7.1	Capacidad del material orgánico animal disponible en la región de la ciudad de Girardot para generar biogás.....	52
7.2	Capacidad del material orgánico vegetal disponible en la región de la ciudad de Girardot.....	53
8	ESTIMACIÓN DEL POTENCIAL DE GENERACIÓN DE BIOGÁS EN LA REGIÓN DEL MUNICIPIO DE GIRARDOT	55
8.1	Metodología	55
8.2	Volumen de producción de biogás en la región de la ciudad de Girardot a partir del material orgánico animal disponible	56
8.3	Volumen de producción de biogás en la región de la ciudad de Girardot a partir del material orgánico vegetal disponible	57
8.4	Resumen de capacidad de producción de biogás	58
8.5	Contenido energético del biogás producido.....	58
9	ANÁLISIS DE RESULTADOS	60
10	CONCLUSIONES	65
11	TRABAJOS FUTUROS	67
	REFERENCIAS.....	69
	ANEXO A – HISTORICO DE TEMPERATURA (°C).....	73
	ANEXO B – HISTORICO DE PRECIPITACION (MM/M2).....	74
	ANEXO C – PROYECCIONES DE DEMANDA DE GAS NATURAL EN LOS DEPARTAMENTOS DE HUILA Y TOLIMA.....	75

ANEXO D – MAPA DE BIOMASA RESIDUAL PECUARIA (SOLO ESTIERCOL) –
SECTOR PORCIONO..... 76

ANEXO E – MAPA DE BIOMASA RESIDUAL PECUARIA (SOLO ESTIERCOL) –
SECTOR BOVINO 77

ANEXO F – MAPA DE BIOMASA RESIDUAL PECUARIA (SOLO ESTIERCOL) –
SECTOR AVICOLA..... 78

ANEXO G – MAPA DE BIOMASA RESIDUAL AGRICOLA – RESIDUOS DE
CULTIVOS DE ARROZ..... 79

ANEXO H – MAPA DE BIOMASA RESIDUAL AGRICOLA – RESIDUOS DE
CULTIVOS DE MAIZ..... 80

ANEXO I – MAPA DE BIOMASA RESIDUAL AGRICOLA – RESIDUOS DE
CULTIVOS DE PLATANO..... 81

LISTA DE GRAFICOS

GRAFICA 1: Proyecciones de crecimiento de población de la ciudad de Girardot...	38
GRAFICA 2: Comportamiento de la temperatura en la región de la ciudad de Girardot en el periodo 1992 - 2011	40
GRAFICA 3: Comportamiento de la precipitación en la región de la ciudad de Girardot en el periodo 1989 - 2011	41
GRAFICA 4: Proyecciones de demanda de gas natural (sector residencial y comercial) de los departamentos de Huila y Tolima	43
GRAFICA 5: Distribución de la capacidad total de producción de biogás en función del origen de la materia orgánica.....	61
GRAFICA 6: Distribución de la capacidad de producción de biogás a partir de residuos orgánicos de origen animal.....	62
GRAFICA 7: Distribución de la capacidad de producción de biogás a partir de residuos orgánicos de origen vegetal.....	63

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1: Esquema general del proceso de producción de biogás.....	21
FIGURA 2: Esquema de bio-digestor chino	23
FIGURA 3: Esquema bio-digestor hindú	24
FIGURA 4: Bio-digestores de laguna cubierta	25
FIGURA 5: Secadero de granos con biogás - Estado de Paraná, Brasil	32
FIGURA 6: Estación de abastecimiento de biogás para buses de servicio público en la región de Östergötland, Suecia.	34
FIGURA 7: Ubicación de Girardot	36
FIGURA 8: Girardot y sus alrededores	37
FIGURA 9: Ubicación de estaciones meteorológicas	39
FIGURA 10: División política de Colombia - Departamentos de Huila y Tolima,	42
FIGURA 11: Municipios ubicados en un área determinada por un radio de 15km alrededor de Girardot	45

LISTA DE CUADROS Y TABLAS

CUADROS

CUADRO 1: Condiciones de temperatura para cada tipo de organismo	22
CUADRO 2: Composición química del biogás en función del tipo de sustrato	26
CUADRO 3: Comparación energética de combustibles.....	27
CUADRO 4: Capacidad de producción de biogás de sustratos de origen animal (estiércol solamente) según diferentes autores (Nm ³ /tonelada)	52
CUADRO 5: Capacidad de producción de biogás de residuos de cultivo de maíz según diferentes autores (Nm ³ /tonelada).....	53
CUADRO 6: Capacidad de producción de biogás de residuos de cultivos de arroz según diferentes autores (Nm ³ /tonelada).....	54
CUADRO 7: Proyecciones de demanda de gas natural de los departamentos de Huila y Tolima.....	75

TABLAS

TABLA 1: Biomasa residual pecuaria sector porcino (toneladas/año).....	47
TABLA 2: Biomasa residual pecuaria sector bovino (toneladas/año)	47
TABLA 3: Biomasa residual pecuaria sector avícola (toneladas/año)	48
TABLA 4: Biomasa residual agrícola – residuos de cultivos de arroz (toneladas/año)	49
TABLA 5: Biomasa residual agrícola – residuos de cultivos de maíz (toneladas/año)	49
TABLA 6: Biomasa residual agrícola – residuos de cultivos de plátano (toneladas/año)	50
TABLA 7: Capacidad de producción de biogás de según el sustrato utilizado	58
TABLA 8: Contenido energético de la capacidad de producción de biogás	59

TABLA 9: Capacidad de producción de biogás según el origen de del material orgánico.....	60
TABLA 10: Producción de biogás (metano (CH ₄) al 65%) en función del sustrato de origen animal utilizado y su equivalente energético.....	61
TABLA 11: Producción de biogás a en función del sustrato de origen vegetal utilizado	63

1 INTRODUCCIÓN

Debido a la necesidad que existe en las diferentes ciudades de utilizar gas natural para realizar diversas actividades tanto a nivel residencial como a nivel comercial, industrial y transporte, es indispensable garantizar el abastecimiento de este combustible. Así mismo, dado el impacto ambiental causado por las emisiones de la combustión de combustibles fósiles, se requiere buscar fuentes energéticas alternativas que puedan satisfacer la demanda mientras se garantiza una producción, operación y utilización limpia de la fuente de energía.

Es por esto que este trabajo presenta una propuesta que pretende cuantificar el potencial que existe una región específica de generar biogás con el fin de evaluar la viabilidad de implementar un proyecto piloto. Para este proyecto se tendrá como caso de estudio la evaluación de la región del municipio de Girardot en el departamento de Cundinamarca, Colombia.

Por otro lado también es necesario realizar un análisis con el fin de identificar el proceso de producción teniendo en cuenta las condiciones del entorno con el fin de facilitar la implementación del proyecto.

Dada la naturaleza del proceso de producción de biogás, es necesario garantizar el suministro de material orgánico como insumo fundamental en la cadena de producción. Es por esto, y en aras de garantizar un correcto funcionamiento de una planta de producción de biogás, que se deben identificar todas las posibles fuentes de obtención de materia prima y su potencial de generación.

1.1 HIPÓTESIS

Una vez establecida el área de influencia del proyecto (Municipio de Girardot y sus alrededores), se pretende confirmar a través de este estudio que existe suficiente material orgánico disponible y utilizable como materia prima para la producción de biogás en un proceso que permita satisfacer parte de la demanda de este tipo de combustibles.

1.2 JUSTIFICACION

Existen diferentes razones por las cuales se pretende realizar este estudio, dentro de las cuales se encuentran la importancia de reducir la dependencia del sistema de abastecimiento convencional de gas natural en el municipio mencionado y la reducción de los impactos ambientales producto de la utilización de combustibles fósiles.

Sin embargo, para efectos de aplicación, este estudio se justifica con la importancia de conocer la capacidad que tiene la región de suministrar material orgánico a una planta de producción de biogás, dado que esta información es fundamental para poder dimensionar y cuantificar el potencial de generación de biogás.

Finalmente, también se puede identificar que otro de los incentivos para la implementación de un proyecto piloto de producción de biogás es la reducción del impacto ambiental causado por la disposición de residuos orgánicos en rellenos sanitarios y la inclusión en el mercado una nueva fuente de abastecimiento de gas la cual permite disminuir el precio del energético junto con la reducción del oligopolio existente.

2 OBJETIVOS

Obtener información que sirva de suministro para decidir sobre la implementación y el diseño futuro de una planta de producción de biogás en la región de la ciudad de Girardot, Colombia. Para esto se propone desarrollar y dar alcance a los siguientes cuestionamientos y actividades:

- Analizar e identificar las diferentes variables y procesos requeridos para la producción de biogás a partir de residuos orgánicos de origen animal y vegetal.
- Caracterizar las condiciones climatológicas de la zona de influencia del proyecto.
- Cuantificar la disponibilidad de material orgánico utilizable para el proceso de producción de biogás en la región de influencia del proyecto.
- Estimar el potencial de producción de biogás en el municipio de Girardot a partir de los insumos disponibles.
- Conocer la capacidad de la producción de biogás para satisfacer la demanda de energía en la región de influencia de la ciudad de Girardot.

Para propósitos de este trabajo el proceso de producción de biogás se enmarcara en un sistema con unas fronteras que van desde la recolección del material orgánico hasta la distribución del producto final.

3 METODOLOGIA

Diferentes actividades fueron realizadas para cumplir con el objeto del presente proyecto, así para iniciar, se realizó una revisión bibliográfica para ilustrar con detalle los procesos relacionados con la producción de biogás y las materias primas que pueden ser utilizadas.

Se realizó una caracterización de la ciudad de Girardot, con el fin de comprender con mas claridad el contexto y las condiciones del lugar donde se pretende implementar el proyecto. De la misma forma, se consultaron bases de datos de la autoridad ambiental regional con el fin de obtener información relacionada con históricos climáticos de la zona. En la información revisada se identificó información de temperatura promedio y promedio de precipitación ya que son variables ambientales que pueden afectar el proceso de producción de biogás. Igualmente se realizó un análisis de la demanda de gas natural en departamentos aledaños al municipio.

Seguido de esto se realizó un levantamiento teórico de información con el fin de identificar las posibles fuentes de materia orgánica disponible en la región, tanto de origen animal como vegetal. Una vez conocidas las fuentes de material orgánico utilizable, se estimó la capacidad de producción de biogás a partir los diferentes recursos. El análisis se basó en consultas bibliográficas, estudiando información de casos de plantas de producción de biogás existentes y revisando otras fuentes de información relacionada con procesos de producción de biogás.

Toda la información fue recopilada, procesada y analizada con ayuda de sistemas digitales como computadores y programas procesadores de palabras y datos.

4 BIOGÁS Y SU PROCESO DE PRODUCCIÓN

El biogás es un gas de origen orgánico generado por microorganismos que actúan sobre materia de origen animal o vegetal. Según Swedish Gas Association (2011) *“El biogás se forma cuando el material orgánico es descompuesto por microorganismos en un ambiente libre de oxígeno...”* en un proceso que se denomina digestión anaeróbica. La digestión anaeróbica requiere de unas condiciones especiales para que el proceso se ocurra de manera adecuada, para esto es necesario controlar algunas variables tales como la temperatura o la acidez del substrato entre otras.

El proceso de digestión anaeróbica se presenta en condiciones naturales generalmente en lugares donde se acumula material orgánico tales como lagunas. Una vez el hombre identificó este mecanismo de producción de biogás, se comenzaron a desarrollar ambientes artificiales, denominados digestores, con el fin de poder obtener biogás de manera óptima y controlada. Este proceso se ha sufrido una evolución considerable, llegando a existir plantas de producción de biogás con un alto nivel de automatización e ingeniería aplicada.

En la Figura 1 se ilustra un esquema general del proceso de producción de biogás, en el cual se puede observar que en la primera etapa se incorpora la materia prima (residuos orgánicos), los cuales, algunos casos pasan por un proceso de pre-tratamiento (pasteurización) con el fin de evitar que agentes patógenos ingresen al proceso. Seguido de esto la materia orgánica es acumulada en el digestor donde es procesada por microorganismos en un proceso controlado. Finalmente del digestor se obtiene dos productos principales; biogás y fertilizante, los cuales pasan a ser distribuidos según sus aplicaciones.

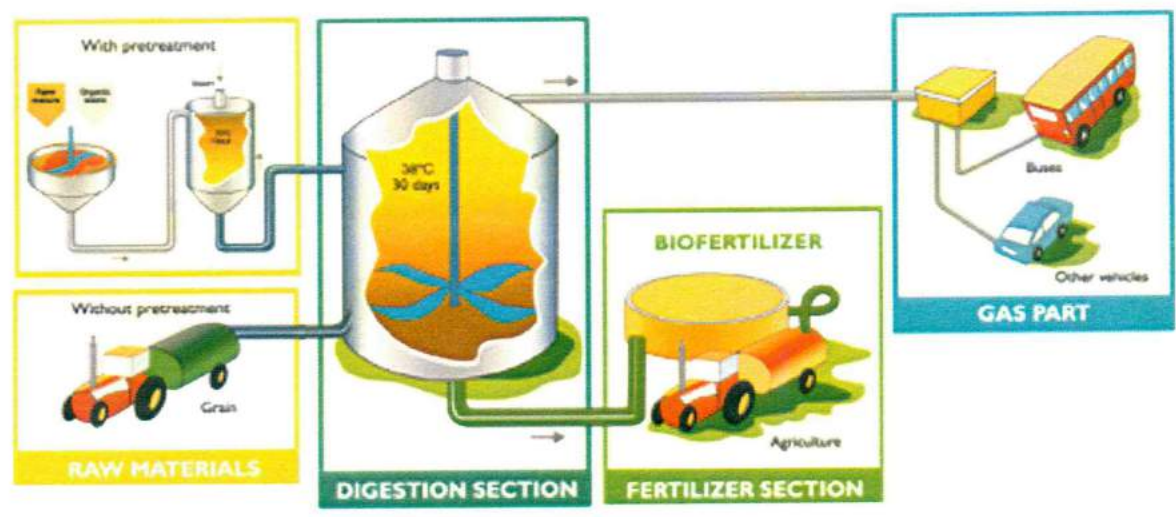


FIGURA 1: Esquema general del proceso de producción de biogás

Fuente: Swedish Biogas International, 2012

4.1 Variables involucradas en el proceso de producción de biogás

La producción de biogás debe ocurrir en un ambiente anaeróbico controlado en el que se garantice las mejores condiciones para los microorganismos con el fin de tener un proceso optimo en el que se obtenga biogás con el mayor contenido de metano (CH₄) posible. Dentro de las variables que más se deben controlar en el proceso se encuentran las siguientes:

(i) Temperatura: La temperatura es una variable que afecta considerablemente la producción de biogás. El impacto causado por la temperatura sobre el proceso de producción depende del tipo de bacteria utilizada en el digester. Según la Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación – FAO, (2011), *“La velocidad de reacción de los procesos biológicos depende de la velocidad de crecimiento de los microorganismos involucrados, que a su vez dependen de la temperatura”*. Igualmente, la FAO indica que *“A medida que aumenta la temperatura, aumenta la velocidad de crecimiento de los microorganismos y se acelera el proceso de digestión...”*

En el Cuadro 1 se presentan los rangos de temperaturas para un adecuado crecimiento de las bacterias utilizadas en los procesos anaeróbicos

CUADRO 1: Condiciones de temperatura para cada tipo de organismo

Tipo de organismo	Temperatura mínima (°C)	Temperatura optima (°C)	Temperatura Máxima (°C)
Psicrófilos	4 -10	15 - 18	20 - 25
Mesófilos	15 – 20	25 - 35	35 - 45
Termófilos	25 – 45	50 - 60	75 - 80

Fuente: Speece, 1996 apud Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO), 2011 – Tabla adecuada por el autor.

Según el Cuadro 1, se puede concluir que para los microorganismos mesófilos el crecimiento óptimo se logra si el bio-digestor se encuentra en un rango de temperatura entre 25°C-35°C.

(ii) Nivel de acidez del sustrato (pH): Dado a la diversidad y calidad del material orgánico utilizado en los procesos de producción de biogás, el nivel de acidez del sustrato puede variar considerablemente. Esta variable es determinante no solo en los niveles de producción del biogás, sino también en la proporción (%) de metano (CH₄) contenido. Según la Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO), 2011, *“Los diferentes grupos bacterianos presentes en el proceso de digestión anaeróbica presentan unos niveles de actividad óptimos en torno a la neutralidad. El óptimo es entre 5.5 y 6.5 para acidogénicos y entre 7.8 y 8.2 para metanogénicos. El pH óptimo para cultivos mixtos se encuentra en el rango entre 6.8 y 7.4, siendo el pH neutro el ideal”*

(iii)Tiempo de retención: El tiempo de retención es un parámetro que se utiliza para indicar la duración del sustrato en el digestor. Dado a que el proceso de producción de biogás depende del crecimiento de microorganismo, estos requieren de algunos tiempos para alcanzar una población capaz de digerir por completo el material orgánico presente. Por otro lado, el tiempo de retención también depende de la facilidad del sustrato a ser digerido por las bacterias

Esta variable se puede cuantificar con claridad procesos de producción de biogás en los que el flujo de materia orgánica no es continuo, es decir en bio-digestores en los que el sustrato se reemplaza totalmente cada vez que completa la

digestión anaeróbica, ya que en los procesos de digestión continuo, la materia orgánica que entra en el sistema, se mezcla con la materia orgánica existente lo que dificulta la identificación del tiempo real de permanencia de los sustratos en el reactor.

4.2 Tipo de bio-digestores

Para el proceso de producción de biogás existen diferentes tipos de digestores, dentro de los cuales se puede destacar tres tipos en particular, los digestores chinos, los digestores hindúes y los digestores de laguna cubierta.

(i) **Bio-digestor chino:** Tal y como se ilustra en la Figura 2, este tipo de digestores cuenta con una única cámara digestora sellada (sin presencia de oxígeno) la cual cuenta con una entrada de materia orgánica, una salida de materia orgánica (ya procesada) y una salida de recuperación del biogás generado. En este caso el flujo de material es un flujo continuo. El digestor es diseñado de tal forma que la materia orgánica fluya a través del sistema gracias a la diferencia de presión causada por el biogás.

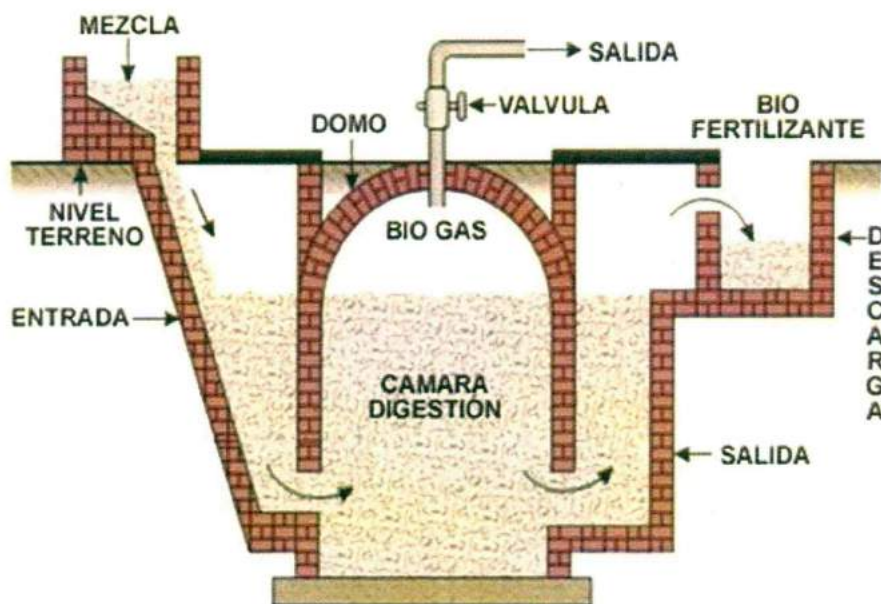


FIGURA 2: Esquema de bio-digestor chino

Fuente: Torres, Arteaga 2009.

(ii) **Bio-digestor hindú:** Este tipo de digestor, es de flujo continuo de materia prima, a diferencia del digestor chino, cuenta con una cámara de digestión que tiene una división la cual se encarga de asegurar un mayor recorrido del material orgánico a través la cámara. También cuenta con una entrada de material orgánico una salida de material orgánico procesado y un punto de captación de biogás ubicado en la parte superior de la cámara de digestión (ver Figura 3). En estos digestores, el material orgánico circula por acción de la gravedad y/o en casos más tecnificados o en plantas con mayor capacidad se puede encontrar la utilización de bombas hidráulicas.

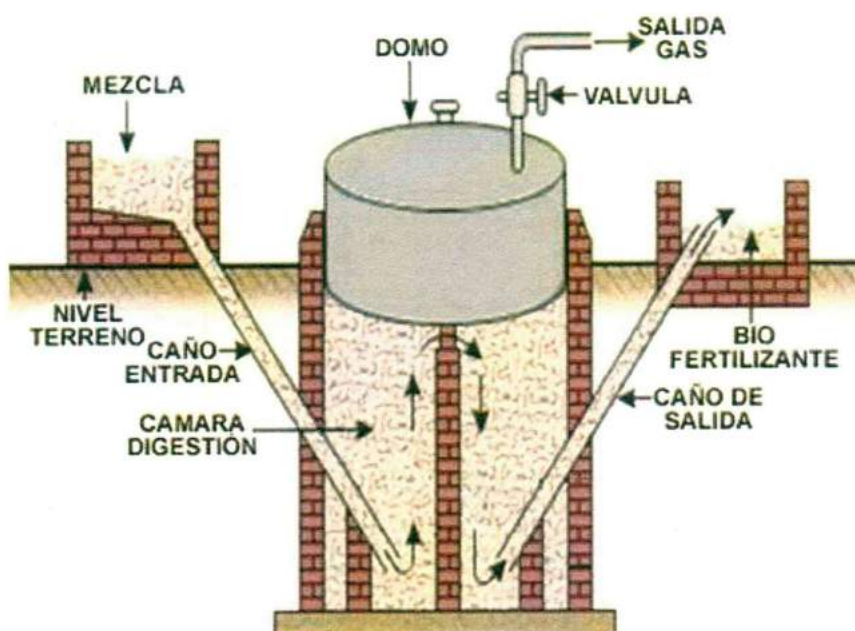


FIGURA 3: Esquema bio-digestor hindú

Fuente: Torres, Arteaga 2009

(iii) **Bio-digestor laguna cubierta:** Este tipo de digestores son implementados en lugares abiertos y con amplio espacio. Su diseño se caracteriza por tener un flujo continuo de materia orgánica en una laguna que debe ser impermeabilizada completamente por membranas poliméricas. Así mismo, la laguna se recubre con otra capa de polímero la cual se encarga de acumular el biogás producido. En la Figura 4, se observan digestores de laguna cubierta. Este tipo de digestores son

recomendados para procesos de producción de biogás en los que se disponga de una alta disponibilidad de residuos orgánicos.



FIGURA 4: Bio-digestores de laguna cubierta

Fuente: Fotografía del Autor

Actualmente es posible encontrar los digestores presentados arriba, su capacidad, operación y tecnología (equipos asociados), depende de cada una de las necesidades de los productores y del presupuesto disponible para la inversión. Existen diversas plantas de producción de biogás con una alta eficiencia pero su precio de instalación es elevado ya que requieren diferentes sub-procesos con tecnologías costosas.

4.3 Características del biogás

El biogás obtenido de los digestores es una mezcla de gases de los que se evidencia la presencia de metano (CH_4), dióxido de carbono (CO_2), ácido sulfhídrico (H_2S) entre otros.

En el Cuadro 2 se presenta una relación de la composición de gases promedio presentes en el biogás. En la tabla se puede observar que el contenido de cada uno

de los compuestos presentes en el biogás varía dependiendo del tipo de materia orgánica utilizada en el proceso de digestión.

CUADRO 2: Composición química del biogás en función del tipo de sustrato

Componentes	Residuos de hogares	Plantas de tratamiento de agua	Residuos de agricultura	Residuos agrícolas y alimentarios
CH ₄ (% vol.)	50-60	60-75	60-75	68
CO ₂ (% vol.)	38-34	33-19	33-19	26
N ₂ (% vol.)	5-0	1-0	1-0	-
O ₂ (% vol.)	1-0	< 0,5	< 0,5	-
H ₂ O (% vol.)	6 (à 40 ° C)	6 (à 40 ° C)	6 (à 40 ° C)	6 (à 40 ° C)
Total (% vol.)	100	100	100	100
H ₂ S (mg/m ³)	100 - 900	1000 - 4000	3000 - 10 000	400
NH ₃ (mg/m ³)	-	-	50 - 100	-
Aromáticos (mg/m ³)	0 - 200	-	-	-

Fuente: Naskeo Environnement, 2009 – Tabla adecuada por el autor.

4.3.1 Contenido energético del biogás

Tal y como ya fue presentado, el biogás es un gas de origen orgánico que se obtiene a partir de materia de origen animal o vegetal. Dado a que existe una gran diversidad de residuos orgánicos disponibles, con características diferentes, el poder calorífico del gas generado en los digestores depende de la materia prima utilizada la cual afecta el porcentaje de metano (CH₄) presente en la mezcla. Así, si se pretende utilizar el biogás como combustible (energético), entonces se debería tratar de garantizar un proceso en el cual el biogás producido contenga el mayor porcentaje de metano (CH₄).

La Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO), en su documento denominado Manual de Biogás, ilustra que el valor calorífico (contenido energético) para un biogás con una composición promedio de 65% metano (CH₄) es de 7 kWh/m³

De esta forma, es posible realizar una comparación del poder calorífico del biogás con el de otros combustibles que son utilizados de manera similar. El Cuadro 3 presenta una comparación energética entre biogás enriquecido (97% de metano (CH₄)) y otros combustibles.

CUADRO 3: Comparación energética de combustibles

Combustible	Equivalente Energético
1 Nm ³ gas natural	11.0 kWh
1 litro Diesel	9.8 kWh
1 Nm³ biogás (97 % metano)	9.67 kWh
1 litro Bencina	9.06 kWh
1 litro E85	6.6 kWh

Fuente: Baltic Biogas Bus Project, 2009 – Tabla adecuada por el autor.

4.4 Manipulación y usos del biogás

El biogás es un gas versátil que puede ser utilizado en diversas aplicaciones, tanto industriales como residenciales. Dado al constante crecimiento de la demanda energética global, así como las necesidades por reducir el impacto ambiental causado por la utilización de combustibles fósiles, el biogás se convierte en una alternativa para solucionar algunas necesidades de la sociedad.

Las decisiones sobre el uso de los combustibles están directamente ligadas a los precios locales el cual a su vez depende de la disponibilidad. En algunas economías, dependiendo del tamaño y de la infraestructura, los precios pueden estar sujetos a los mercados internacionales.

Para contar con un suministro confiable del combustible es importante considerar algunos procesos dentro de la cadena de producción y abastecimiento tales como el enriquecimiento del biogás, el almacenamiento y la distribución.

Dado que gran parte de su contenido es metano (CH₄), más comúnmente llamado gas natural, no se requiere realizar modificaciones a los equipos ante un eventual uso de biogás enriquecido. Así, es posible utilizar directamente el biogás enriquecido en procesos de generación de electricidad, generación térmica o como combustible para el transporte.

4.4.1 Enriquecimiento de biogás

Tal y como se ilustró anteriormente, el biogás es un gas compuesto por diferentes gases, dentro del cual se puede encontrar metano (CH₄) en una

concentración entre 50% y 75% (ver Cuadro 2). Gracias a sus propiedades energéticas, sus tipos de aplicaciones y ventajas ambientales de su utilización, el metano (CH₄) es el gas con mayor interés a ser obtenido.

A partir de esta necesidad, se han desarrollado diferentes técnicas y tecnologías para extraer del biogás el mayor contenido de metano posible y así poder utilizarlo en aplicaciones como combustible para transporte (motores de combustión interna), generación de electricidad y aplicaciones industriales específicas entre otras.

Según la International Energy Agency (IEA) – Bioenergy (2009), actualmente existen las siguientes técnicas para remover el dióxido de carbono (CO₂) del biogás para así obtener un gas con una mayor densidad energética:

(i) Pressure Swing Adsorption (PSA): *“con esta técnica el dióxido de carbón es adsorbido por una superficie en condiciones de presión elevada. El material de adsorción es generalmente carbón activado o zeolitas...”*

(ii) Absorción: *“...en esta técnica el biogás se enfrenta a un flujo opuesto de un líquido... El principio detrás del proceso de absorción es que el dióxido de carbono es más soluble que el metano... el gas a la salida de la columna tendrá un incremento en la concentración de metano. Tres ejemplos de la tecnología de absorción son el water scrubbing, organic physical scrubbing y chemical scrubbing.”*

(iii) Membranas: *“...membranas secas para enriquecimiento de biogás son hechas de materiales que permiten el paso de dióxido de carbono, agua y amonía... mientras que el nitrógeno y metano pasan solo en pequeñas proporciones... este método es comúnmente utilizado en enriquecimiento de biogás producido en botaderos de basura...”*

Por otro lado, la bibliografía y el mercado ilustran que se están desarrollando técnicas como enriquecimiento criogénico y enriquecimiento in-situ, la cuales son técnica que se encuentran en fase de estudio y algunas de ellas aun no son viables

a escalas de procesos de producción de biogás industriales por sus altos costos o dificultad de operación.

4.4.2 Almacenamiento:

Según Al Seadi, Teodorita, et al (2008), existen diversas maneras para almacenar biogás las cuales se pueden clasificar en tanques de baja presión, media presión y alta presión. Los tanques de baja presión son construidos por membranas poliméricas en la mayoría de los casos y están diseñados para almacenar biogás a presiones entre 0,05 mbar - 0,5 mbar. Por otro lado, los tanques de alta presión los cuales permiten almacenar el gas a una presión de hasta 250 bares. Estos tanques generalmente son construidos de materiales rígidos como acero. El almacenamiento de biogás a alta presión requiere unas condiciones técnicas más altas y demanda una gran cantidad de energía para alcanzar las presiones técnicas requeridas. Finalmente, hace referencia a las antorchas/quemadores las cuales son utilizadas con fines de seguridad de la planta de producción así como para reducir el impacto ambiental del biogás en el ambiente

También se puede encontrar en el mercado soluciones como la licuefacción la cual reduce el volumen del gas y permite un almacenamiento más eficiente del metano (CH_4). Esta tecnología también permite mejorar la eficiencia del transporte del combustible ya que brinda un mayor rango de transporte (distribución) sin comprometer considerablemente la relación energía despachada vs. energía utilizada para ser transportada. Sin embargo, esta técnica es la más costosa actualmente y la que más energía demanda. Ya que el proceso requiere la utilización de bombas de alta presión, así como dispositivos para reducir la temperatura del gas.

En la mayoría de los casos los sistemas de almacenamiento depende de factores económicos y del tamaño de las plantas ya que incrementan los costos y la hacen el proceso más complejo. Por esto es necesario encontrar soluciones con un dimensionamiento adecuado y que satisfagan las necesidades de cada centro de producción para que sea viable su implementación.

Finalmente es importante mencionar que la seguridad de las instalaciones de las plantas de generación de biogás debe prevalecer sobre los demás factores y estas deben contar con equipos de monitoreo suficientes y adecuados para prevenir incidentes de manera proactiva.

4.4.3 Distribución

En muchos casos el biogás generado es aprovechado directamente en el sitio de producción, ya sea al servir como suministro de combustible para una planta de generación de electricidad o alimentar quemadores que son utilizados en procesos térmicos. Sin embargo en plantas de producción de gran escala, es importante tener en cuenta la forma en la que puede ser despachado el gas producido.

Se pueden considerar dos métodos para la distribución del biogás. Su utilización depende principalmente de la disponibilidad de infraestructura y de la capacidad de inversión.

(i) **Gasoductos:** Los gasoductos son un sistema adecuado para el transporte del gas, ya que al entrar al sistema el gas puede ser distribuido hasta los usuarios finales. Actualmente, Colombia cuenta con infraestructura de transporte de gas natural de origen fósil, la cual se utiliza para llevar el combustible desde los yacimientos hasta los consumidores finales (ej. plantas industriales, centrales termoeléctrica, etc.) y puntos de conexión con redes de distribución en las ciudades. Es importante mencionar que varias ciudades colombianas, cuentan con redes de distribución local residencial de gas natural.

Teniendo en cuenta esta tipo de infraestructura, las plantas de generación de biogás podrían conectarse a las redes de distribución local y/o nacional siempre y cuando cumpla con los estándares de operación, seguridad y calidad requeridos. Así, con este tipo de sistemas, el combustible tiene la posibilidad de ser comercializado en un mercado estructurado y con una demanda considerable.

(ii) **Camiones distribuidores:** Este es un sistema de distribución que depende de una infraestructura vial que por lo general tienen una amplia cobertura en la

mayoría de los países. Igualmente, es indispensable que cumpla con estándares de seguridad.

Para mejorar la eficiencia de este proceso, se requiere que el gas pase por el proceso de licuefacción, el cual a pesar de aumentar los costos de la operación, permite que se transporte una mayor cantidad de energía por viaje. Igualmente, se requiere que el lugar de destino cuente con una capacidad de almacenamiento adecuada.

Para el proceso de distribución a través de camiones, se debe tener en cuenta que las distancias a recorrer no demanden un consumo energético muy alto con el fin de garantizar un balance energético de toda la cadena de producción favorable.

4.4.4 Aprovechamiento energético

Gracias a su naturaleza, el biogás puede ser utilizado como energético para alimentar diferentes procesos industriales. Dentro de estos, la energía contenida en el metano se puede aprovechar a través de generación de electricidad o en aplicaciones que requieran energía térmica.

(i) Generación de electricidad a partir de biogás: El biogás puede ser utilizado en procesos de combustión para la generación de electricidad. Para convertir el biogás en electricidad es posible utilizar motores de combustión interna o turbinas de gas que transformen la energía química en energía mecánica y esta a su vez sea transmitida por un eje a un generador de electricidad.

Los sistemas motor/turbina – generador, se encuentran disponibles en diferentes rangos de capacidad, desde cientos de kW hasta cientos de MW. Estos sistemas deben ser diseñados y dimensionados adecuadamente, garantizando que cuenten con los equipos de seguridad y con los sistemas de operación necesarios.

Según la Unidad de Planeación Minero Energética – UPME, (2012), actualmente, en Colombia, el parque generador de electricidad tiene cerca de 14.500 MW instalados y está conformado por una matriz de generación con una

participación de generación térmica de 32% aproximadamente. Se calcula que cerca del 70% de las centrales de generación termoeléctrica en Colombia opera con gas como combustible primario. Así se puede evidenciar que los desarrollos de proyectos de producción de biogás tienen un gran mercado en el cual pueden vender su producto.

(ii) Aprovechamiento térmico de biogás: Dadas las características del biogás este puede ser utilizado en procesos térmicos industriales y residenciales tales como secado de productos agrícolas (ver Figura 5), procesado de alimentos, refinerías, calderas, calentamiento de agua entre otros.

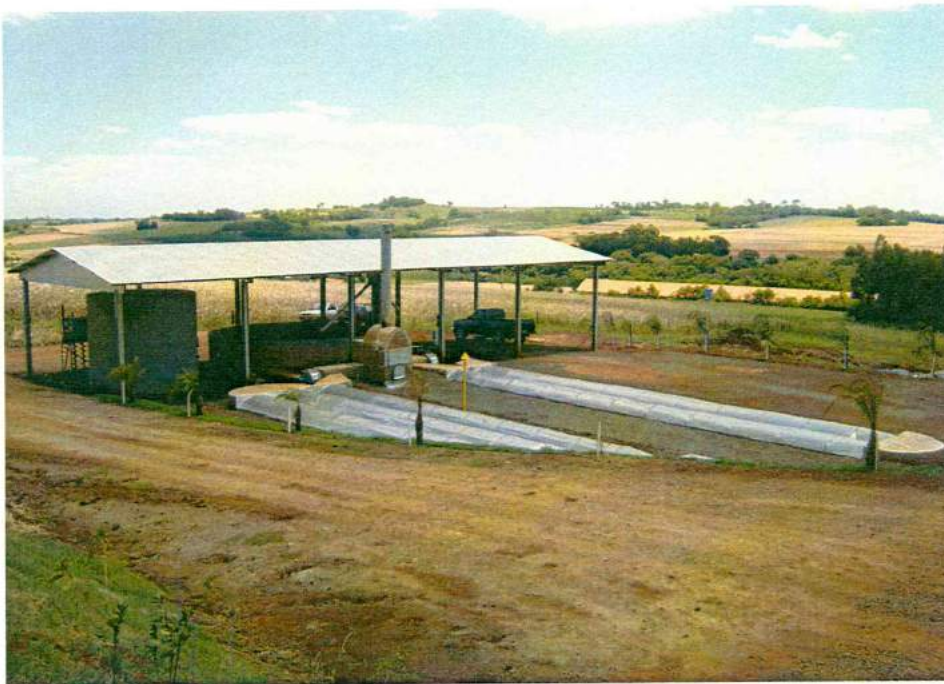


FIGURA 5: Secadero de granos con biogás - Estado de Paraná, Brasil

Fuente: Fotografía del Autor

Una de las ventajas del biogás es su fácil utilización en procesos térmicos. Dado que gran parte del biogás generado es metano (CH_4), no es necesario hacer modificaciones técnicas a los equipos que ya utilizan gas natural como combustible. Sin embargo, es recomendable utilizar biogás enriquecido ya que se puede garantizar un contenido volumétrico de metano superior al 90%, logrando así un mejor proceso de combustión.

4.4.5 Combustible para transporte

Dentro de las posibles aplicaciones en las que se puede tener un aprovechamiento apropiado del biogás es en su utilización como combustible para el transporte.

Actualmente existen diferentes iniciativas que incentivan la utilización de biocombustibles como fuente de energía para el transporte. Gran parte de estas iniciativas provienen de gobiernos y organizaciones de carácter supranacional (ej. Unión Europea, Naciones Unidas, etc.) las cuales tienen como principal justificación la preocupación por reducir el impacto ambiental causado por los combustibles fósiles, así como reducir la dependencia de fuentes de energía no renovables.

Para la utilización del biogás como combustible para el transporte se requiere que cumpla con las características técnicas mínimas para la operación de los motores de combustión interna. Por esto es necesario que el biogás pase por el proceso de enriquecimiento, con el fin de garantizarles a los usuarios finales un gas con alto contenido de metano (CH_4), así como por un proceso de desulfuración que elimine las partículas de azufre (S) el cual es un agente que acelera el proceso de corrosión reduciendo la vida útil de los elementos de los motores.

La utilización del biogás como combustible es muy atractiva ya que las emisiones productos de su combustión son emisiones biogénicas ya que tiene un origen orgánico y no cuentan como gases de efecto de invernadero. Por otro lado, considerando los precios actuales del mercado, operar vehículos con biogás es más económico que operarlos con combustibles líquidos (ej, gasolina, diesel, etc.).

Como manera de ejemplo se puede mencionar el caso de la región de Östergötland, Suecia, en donde ciudades como Linköping y Norrköping operan buses de servicio público con biogás. Según la International Energy Agency (IEA) (2007), el biogás producido proviene principalmente de residuos orgánicos de la industria, desechos residenciales, residuos de mataderos, plantas de tratamiento de aguas residuales y estiércol de res y cerdo. Estas ciudades cuentan con la

infraestructura (ver Figura 6) necesaria para garantizar un óptimo abastecimiento de combustible a los buses que prestan el servicio público.



FIGURA 6: Estación de abastecimiento de biogás para buses de servicio público en la región de Östergötland, Suecia.

Fuente: Tekniska Verken, 2011

En Colombia, en la última década, se generó un gran interés por parte de los usuarios de automotores por convertir los motores de sus vehículos, reemplazando así la utilización de combustibles líquidos por gas natural (metano (CH_4)). Esto ocurrió gracias a la instalación de redes de distribución de gas natural en las principales ciudades ya que se garantizaba el abastecimiento de manera continua y confiable en las estaciones de servicio. Hoy en día existe un gran interés de utilizar gas natural en la mayoría de vehículos de servicio público, taxis principalmente y en vehículos de transporte de carga de mediana capacidad.

Actualmente se están realizando pruebas para utilizar vehículos del sistema de transporte masivo en Bogotá D.C., así como la reciente entrada en operación de buses alimentados con gas natural al sistema MetroPlus de la ciudad de Medellín. Es importante tener en cuenta que se requiere de una infraestructura adecuada que garantice el abastecimiento de los combustibles y que los vehículos utilizados garanticen la confiabilidad del servicio.

4.5 Subproductos del biogás

En algunas plantas de producción de biogás, dependiendo de la complejidad de su proceso de producción, se puede contar con algunos subproductos, dentro de los que se puede resaltar los bio-fertilizantes y el dióxido de carbono (CO_2).

Estos productos pueden ser vendidos a agentes externos, en mercados locales, para que los proyectos de producción de biogás perciban otros ingresos económicos, lo que en algunos casos harían viable la construcción y operación de la planta de producción de biogás.

(i) Bio-fertilizantes: Gran parte del material orgánico utilizado en el proceso de digestión queda en el digestor en un estado líquido + sólido, el cual, dependiendo de sus propiedades y origen, puede ser utilizado como insumos agrícolas. Así, se puede obtener bio-fertilizantes líquidos y sólidos con diferentes contenidos de nitrógeno (N), fósforo (P) y potasio (K) para mejorar las condiciones de suelos cultivables.

Es importante mencionar que para utilizar los bio-fertilizantes en cultivos destinados al consumo humano, se requiere que la materia orgánica de origen esté libre de agentes patógenos o tóxicos que puedan atender contra la salud humana. Para esto en algunos casos, las plantas productoras de biogás cuentan con un proceso de pasteurización de la materia prima antes del ingreso al digestor.

(ii) Dióxido de carbono (CO_2): Dado que un gran porcentaje del biogás es dióxido de carbono (ver Tabla 2), este se somete, en algunos casos, a un proceso de enriquecimiento, el cual separa el dióxido de carbono (CO_2) del metano (CH_4). El dióxido de carbono (CO_2) obtenido puede ser utilizado en aplicaciones industriales tales como procesos de refrigeración o puede ser aprovechado en invernaderos artificiales de productos agrícolas como cultivos de flores.

5 GIRARDOT, COLOMBIA

La ciudad de Girardot se encuentra ubicada en el departamento de Cundinamarca a 130 km. (aproximadamente) de la capital del país, Bogotá D.C. (Ver Figura 7). La ciudad se ubica geográficamente en una región denominada Alto Magdalena, la cual hace parte de la cuenca del río Magdalena¹. A sus alrededores se encuentran los municipios de Nariño, Tocaima, Ricaurte, Coello y Flandes, así mismo está delimitada por el río Magdalena y el río Bogotá

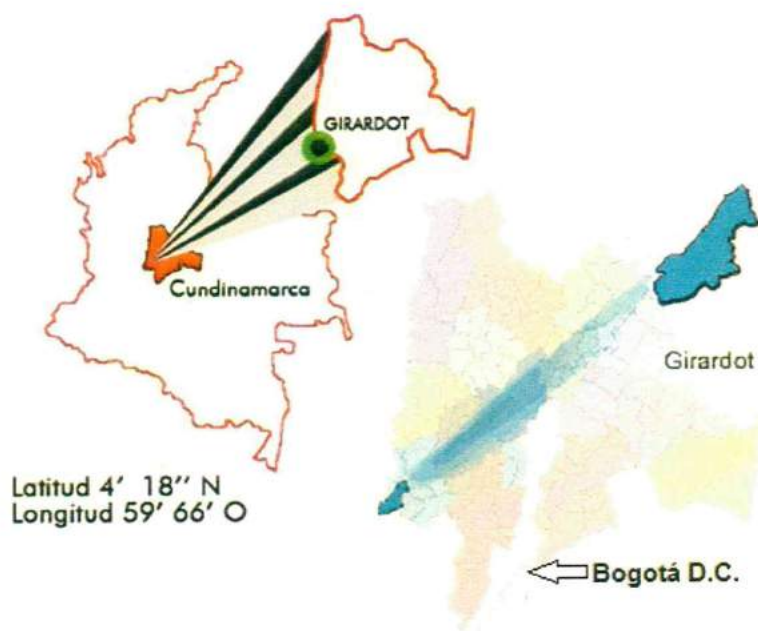


FIGURA 7: Ubicación de Girardot

Fuente: Figura construida con imágenes de la pagina web de la Alcaldía de Girardot, 2008 y 2009

¹ El río Magdalena es uno de los principales afluentes del país. El río corre de sur a norte, su nacimiento es en el departamento del Huila y desemboca en el mar Caribe en el departamento del Atlántico. Tiene una longitud cerca de 1500 km y un caudal medio alrededor de 7000m³/s, por cuanto es una cuenca que permite aprovechamiento energético. Actualmente existe una central hidroeléctrica denominada Betania con una capacidad de 540MW y se está desarrollando el proyecto hidroeléctrico El Quimbo con una capacidad nominal estimada de 420MW.

De acuerdo a la información presentada por el portal de internet oficial del gobierno local (Alcaldía de Girardot, 2012), la ciudad se encuentra ubicada a 289 metros sobre el nivel del mar (m.s.n.m.) y cuenta con una extensión total aproximada (área rural: 109 km² + área urbana: 20 km²) de 129 km² (ver Figura 8).

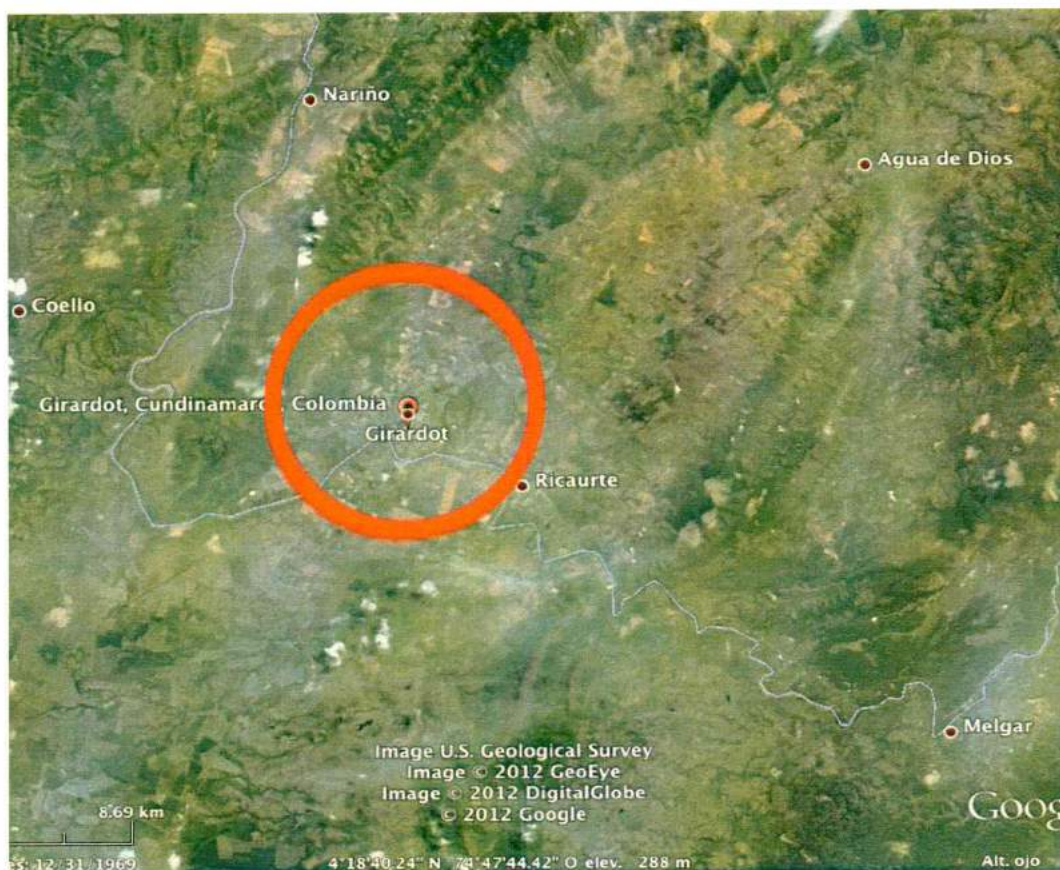
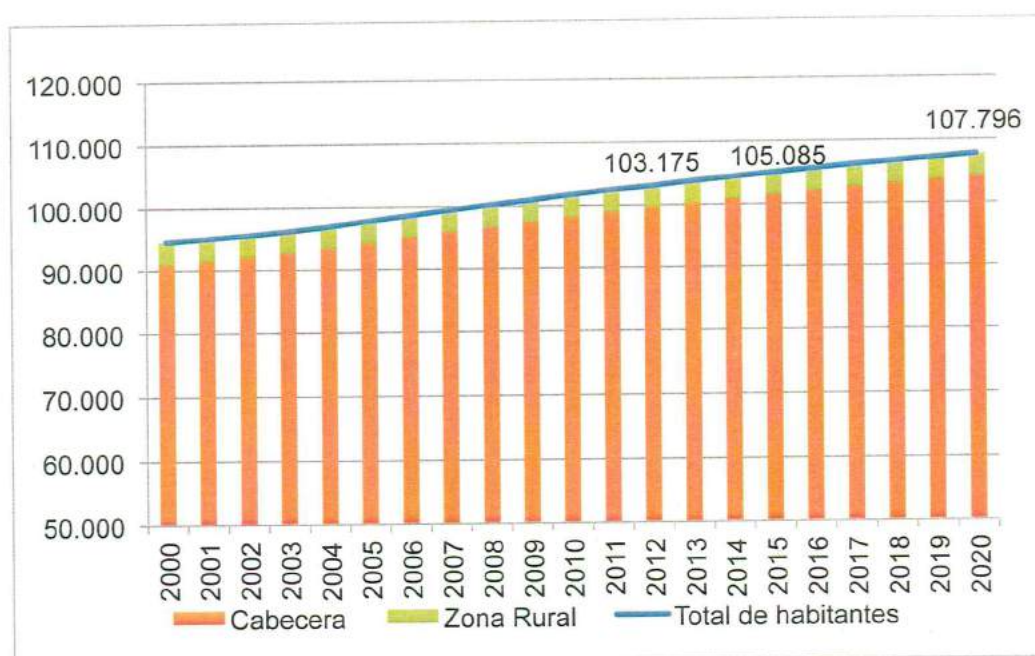


FIGURA 8: Girardot y sus alrededores

Fuente: Imagen tomada del software libre Google Earth, 2012

La actividad económica de Girardot se encuentra centrada en 3 ejes importantes: el turismo, la agricultura y la ganadería. En cuanto a la agricultura, se desarrollan cultivos comerciales de algodón, sorgo, arroz y maíz. En menor escala, se produce plátano, yuca, cítricos y otras frutas como mangos, melones y sandías, y se cultivan plantas aromáticas. Según la página web del municipio de Girardot, en la actualidad el sector agrícola utiliza solo el 35% de las tierras cultivables. Con respecto a la ganadería, está representada por la cría de bovinos para carne y leche, además de la porcicultura y de la presencia de industria avícola.

Según la información suministrada por las proyecciones del Departamento Administrativo Nacional de Estadística (DANE) el número de habitantes en la cabecera municipal alcanzaba los 99.018 mientras que en la zona rural llegaba a los 3.474 en el año 2011. Estas cifras significan una densidad de población de 12,986 habitantes/km² aproximadamente. Así mismo, el DANE pronostica un crecimiento continuo de la población en los próximos años (ver Grafica 1).



GRAFICA 1: Proyecciones de crecimiento de población de la ciudad de Girardot

Fuente: Grafica elaborada por el autor con datos presentados por el Departamento Administrativo Nacional de Estadística (DANE)

En los últimos años la ciudad ha presentado un crecimiento considerable tanto en población permanente como en población flotante (turistas). Esto se puede ver reflejado en el sector de la construcción, ya que se han desarrollado proyectos urbanísticos como condominios, complejos de viviendas y la aparición de almacenes de cadena. Igualmente se proyecta que la ciudad continúe creciendo. Un ejemplo de esto es la proyección de la construcción para el 2014 de un gran centro comercial llamado Unicentro Girardot por la firma Pedro Gómez y Cia.

5.1 Caracterización climática de Girardot

Dado que el clima es un factor influyente para el proceso de producción de biogás, se realizó una búsqueda de información sobre el comportamiento histórico las siguientes variables climatológicas:

- Temperatura
- Precipitaciones

La Corporación Autónoma Regional (C.A.R.) es la autoridad ambiental regional la cual se encarga de monitorear diferentes variables climatológicas. Así, se realizó una consulta en su base de datos virtual y se identificaron dos estaciones meteorológicas en el área de influencia (ver Figura 9) la cuales se denominan estación Argelia y estación Pozo azul

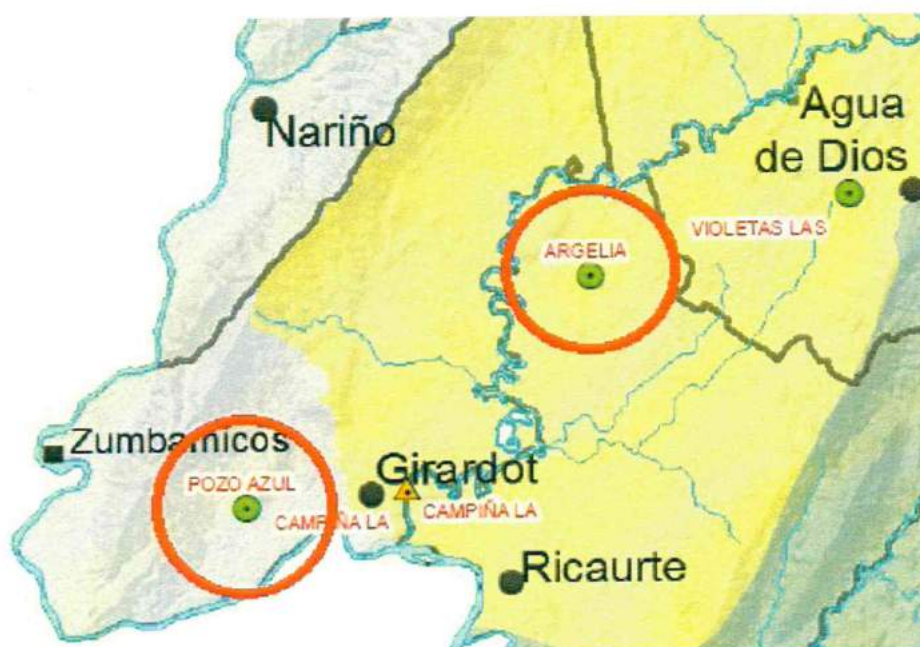


FIGURA 9: Ubicación de estaciones meteorológicas

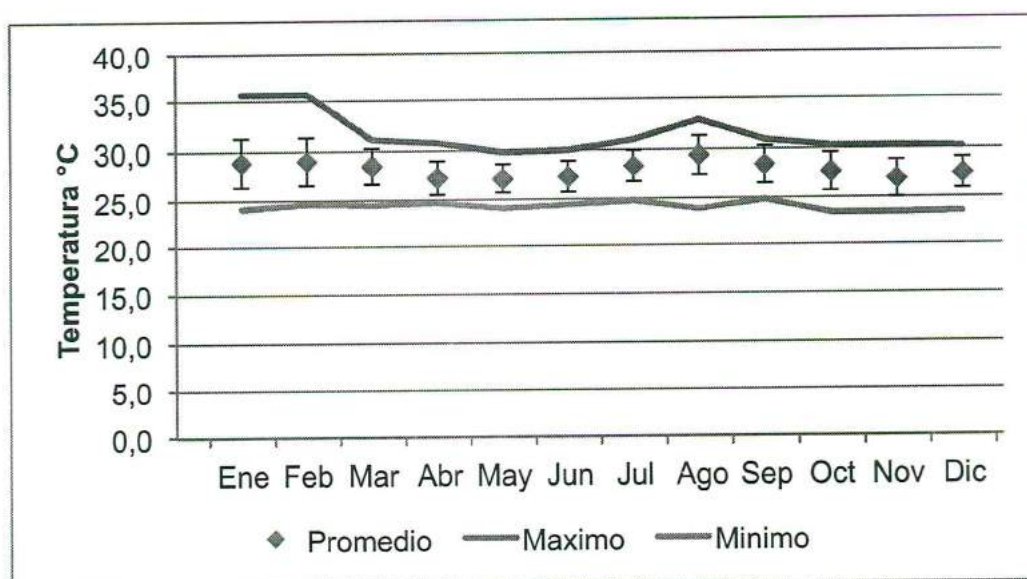
Fuente: Corporación Autónoma Regional (C.A.R.) (A), 2012

(i) **Temperatura:** Tal y como se presentó en el capítulo 4, la temperatura es una de las variables más influyentes en el proceso de producción de biogás, de ahí la importancia de conocer con claridad su comportamiento. Para esto se realizó un análisis de los datos históricos obtenidos por la estación meteorológica de la

Corporación Autónoma Regional (C.A.R.) denominada Argelia desde el año 1992 hasta el año 2011 (ver Anexo A).

A partir de los datos analizados se construyó la Grafica 2 que muestra el comportamiento mensual histórico promedio de la temperatura, así como los valores máximos y mínimos de los promedios mensuales. Las barras de error ilustran el rango de los datos teniendo en cuenta una desviación estándar respecto a la media.

Según el registro de datos de la C.A.R. la temperatura anual promedio de la región donde se ubica Girardot es de 28,02°C, con un registro de un promedio mensual máximo de 35,70°C y un mínimo de 23,40 °C.



GRAFICA 2: Comportamiento de la temperatura en la región de la ciudad de Girardot en el periodo 1992 - 2011

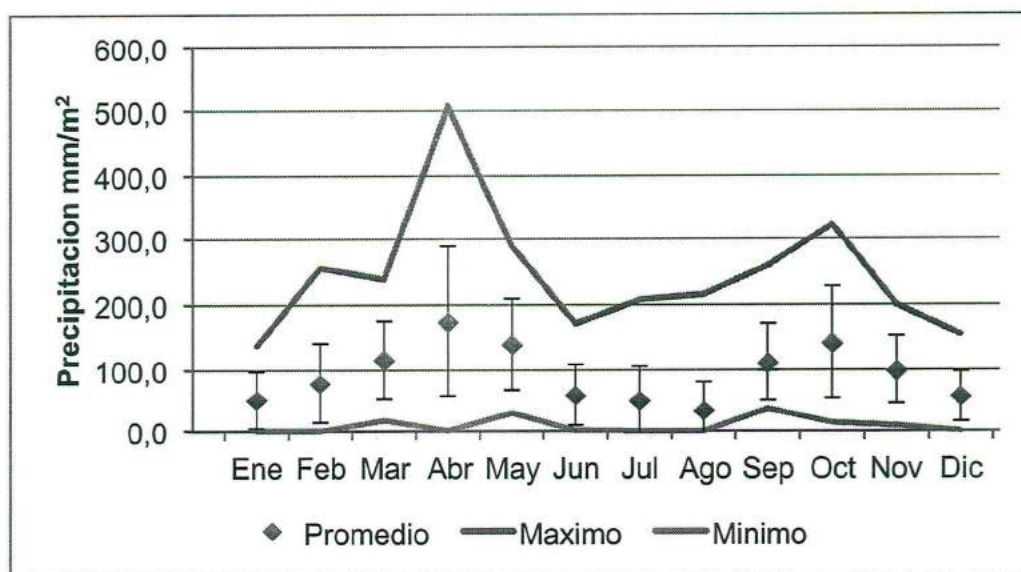
Fuente: Grafica elaborada por el autor con datos obtenidos de Corporación Autónoma Regional (C.A.R.) (B), 2012

Esta información permite determinar que la temperatura promedio de Girardot se encuentra dentro del rango ideal para la producción de biogás con bacterias mesófilas (ver Cuadro 1).

(ii) Precipitación: Así mismo, se analizaron los datos relacionados con los históricos de precipitación promedio mensual en la región (ver Anexo B).

En este caso se estudiaron los registros de la estación meteorológica denominada Pozo Azul entre los años 1989 y 2011 (ver Grafica 3). Acá se encontró, con un promedio anual de 92.46 mm/m².

Esta variable es importante si se tiene en cuenta la importancia de las lluvias para la agricultura y por ende para la disponibilidad de material orgánico de origen vegetal. Según los datos analizados, a pesar de contar con mínimos pronunciados de precipitación en la región (promedio mensuales de 0 mm/m²), no se evidencian largos periodos de no lluvia.



GRAFICA 3: Comportamiento de la precipitación en la región de la ciudad de Girardot en el periodo 1989 - 2011

Fuente: Grafica elaborada por el autor con datos obtenidos de Corporación Autónoma Regional (C.A.R.) (C), 2012

5.2 Demanda de gas natural en la región

Como ya se presentó, Girardot es una ciudad ubicada en la región del Alto Magdalena, la cual limita con los departamentos de Tolima y Huila (ver Figura 10). Esta región cuenta diversas ciudades dentro de las cuales se puede mencionar Neiva e Ibagué las cuales cuentan con vías de acceso adecuada que las comunican directamente con la capital de país a través de Girardot. Según las proyecciones de

crecimiento de la población del Departamento Administrativo Nacional de Estadística (DANE), el departamento del Tolima cuenta actualmente (año 2013) con 1'400.140 habitantes, mientras que el departamento del Huila tiene 1'126.316 habitantes, para un total de 2'215.109 ciudadanos

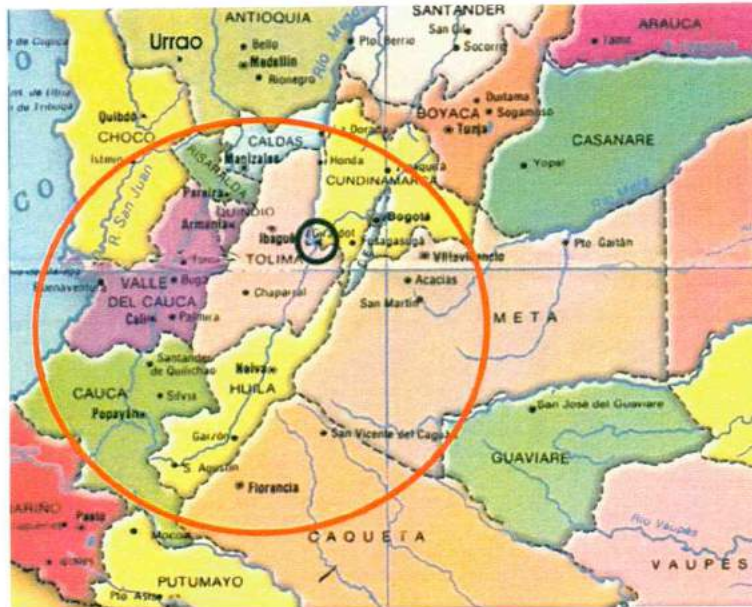
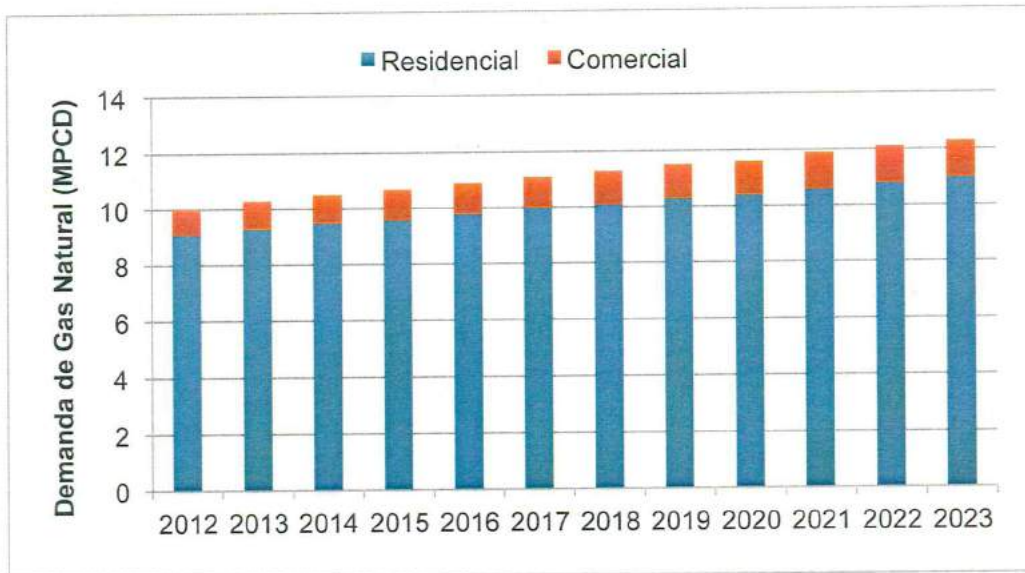


FIGURA 10: División política de Colombia - Departamentos de Huila y Tolima,

Fuente: Colombia Vive, 2011. Figura adecuada por el autor

Por otro lado, según la Unidad de Planeación Minero-Energética (UPME) (2004), en su documento Proyecciones de Demanda de Gas Natural Sector Residencial y Comercial, presenta que en la región Huila – Tolima habrá un consumo de gas natural de 9,3 MPCD (1'024.620 MWh/año) en el sector residencial y 1,0 MPCD (110.174 MWh/año) en el sector comercial, para un total de 10,3 MPCD (1'134.794 MWh/año) (ver Anexo C) durante el año 2013

Así mismo, la Grafica 4, ilustra la evolución del crecimiento de la demanda de los sectores residencial y comercial, según los datos presentados por la Unidad de Planeación Minero-Energética (UPME). En la grafica se observa una proyección de crecimiento constante del consumo de gas natural en los departamentos de Huila y de Tolima en los próximos años.



GRAFICA 4: Proyecciones de demanda de gas natural (sector residencial y comercial) de los departamentos de Huila y Tolima

Fuente: Grafica elaborada por el autor con datos de la Unidad de Planeación Minero Energética (UPME)

6 DISPONIBILIDAD DE MATERIAL ORGÁNICO CON POTENCIAL PARA GENERAR BIOGÁS EN LA REGIÓN DEL MUNICIPIO DE GIRARDOT

Como parte fundamente del proceso de producción de biogás, es necesario determinar la disponibilidad de materia orgánica para alimentar los bio-digestores. Con el fin de conseguir este resultado se establece una metodología, se realiza un análisis de información y se presenta el inventario del recurso disponible en la zona.

6.1 Metodología

Para el análisis de disponibilidad de materia orgánica es indispensable definir una metodología, con el fin de obtener resultados confiables y de fácil verificación.

Dadas las características del trabajo, el método para la estimación de disponibilidad de materia orgánica en la región de la ciudad de Girardot se basó en un análisis de la información disponible en el documento denominado ***Atlas de biomasa residual***. En particular se revisan los mapas que presenta la disponibilidad de materia orgánica (volumen) producida en el sector agrícola así como la producción de desechos del sector pecuario en un periodo de tiempo anual.

Por otro lado, para este ejercicio, fue importante delimitar la zona de análisis. Así, para la estimación de la materia orgánica disponible en la región donde se ubica Girardot, se consideran los municipios que se encuentran ubicados dentro de un área con un radio aproximado de 15 km a la redonda del casco urbano de la ciudad. Esta distancia se considera adecuada, teniendo en cuenta los costos del transporte así como el gasto de combustible requerido para trasladar la carga en camiones propulsados por motores diesel. Tal y como se puede observar en la Figura 11 los

municipios de Ricaurte, Nariño, Flandes y Coello se encuentran dentro del perímetro definido.

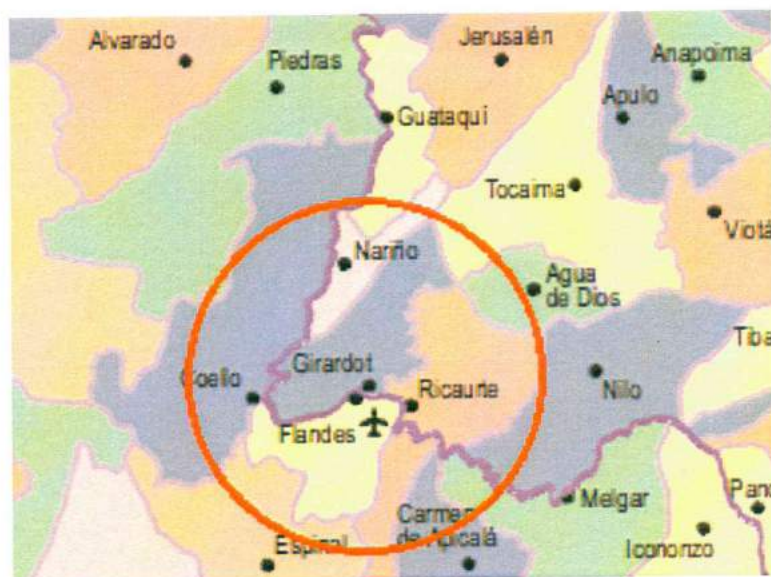


FIGURA 11: Municipios ubicados en un área determinada por un radio de 15km alrededor de Girardot

Fuente: Figura elaborado por el autor con imágenes del Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC)

Los municipios de Agua de Dios y Carmen de Apicalá, se encuentran cerca del radio de cobertura del análisis, sin embargo no cuenta con vías de acceso adecuadas lo cual dificultaría el transporte del material orgánico. Por otro lado, el municipio del Espinal, cuenta con una gran disponibilidad de materia orgánica proveniente de cultivos de arroz, no obstante es importante analizar el costo de transportar dicho material teniendo en cuenta la distancia a que se debe recorrer.

6.2 Atlas del Potencial Energético de la Biomasa Residual en Colombia

El Atlas del Potencial Energético de la Biomasa Residual en Colombia es un documento desarrollado por el Ministerio de Minas y Energía (MME), el Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial (MAVDT), la Unidad de Planeación Minero-Energética (UPME), el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM), el Departamento Administrativo de Ciencia, Tecnología e

Innovación (Colciencias) y la Universidad Industrial de Santander (UIS) con el fin de determinar el volumen de biomasa residual producida en Colombia.

El documento explica los diferentes criterios que se utilizaron para la selección de las fuentes del recurso orgánico a evaluar, las fuentes de información, así como algunas recomendaciones sobre la interpretación de la información.

El atlas presenta los resultados en tres capítulos. El primer capítulo muestra la caracterización de la biomasa residual de proveniente de la agricultura, el segundo capítulo presenta la información relacionada con los residuos orgánicos de origen animal y el tercer capítulo ilustra Mapas del Sector Residuos Sólidos Orgánicos Urbanos. Finalmente, el documento incluye anexos en los que se ilustran información general sobre la biomasa así como el procedimiento y protocolo para realizar las muestras y la caracterización de la biomasa residual en Colombia.

6.3 Inventario de material orgánico disponible en la región

Para la estimación del volumen del material orgánico disponible se revisaron los mapas de material orgánico de origen animal (estiércol únicamente) y de material orgánico de origen vegetal tal y como se presenta a continuación.

6.3.1 Material orgánico de origen animal (estiércol únicamente)

Para identificar la disponibilidad de material orgánico de animal se estudiaron los mapas del documento Atlas de Biomasa Residual de Colombia denominados BIOMASA RESIDUAL PECUARIA – Cantidad municipal anual de estiércol del sector porcino (ver Anexo D), BIOMASA RESIDUAL PECUARIA – Cantidad municipal anual de estiércol del sector bovino (ver Anexo E) y BIOMASA RESIDUAL PECUARIA – Cantidad municipal anual de estiércol del sector avícola (ver Anexo F).

Según la UPME (2010), *“la información sobre la población y localización de los animales, para el caso del subsector avícola y bovino, fue suministrada por el Instituto Colombiano Agropecuario”* así mismo, la UPME (2010) indica que *“... para el sector porcino por la Asociación Colombiana de Porcicultores. En cuanto a la cantidad de estiércol generado por especie, ésta se fundamentó en la consulta*

directa a expertos y correspondió a los años 2007 y 2008. Estos mapas se elaboraron tomando como base la cartografía oficial de la división política y administrativa de Colombia, IGAC 2006.”

Así, según la información contenida en los diferentes mapas, las siguientes tablas ilustran la disponibilidad anual de material orgánico de origen animal (estiércol únicamente) en la región donde se ubica la ciudad de Girardot:

En la Tabla 1 se puede observar un volumen de producción similar para cuatro de los municipios estudiados, sin embargo, el municipio de Ricaurte registra un volumen de producción de biomasa residual pecuaria del sector porcino superior.

TABLA 1: Biomasa residual pecuaria sector porcino (toneladas/año)

Ciudad	Escenario bajo	Escenario Alto	Promedio
Girardot	0	10.000	5.000
Flandes	0	10.000	5.000
Ricaurte	10.000	50.000	30.000
Coello	0	10.000	5.000
Nariño	0	10.000	5.000
Total	10.000	90.000	50.000

Fuente: Tabla elaborada por el autor con datos de Unidad de Planeación Minero Energética (UPME), 2010

La Tabla 2 presenta la información relacionada con la biomasa residual pecuaria del sector bovino, en este caso es importante resaltar el alto volumen de estiércol producido en el municipio de Coello, el cual alcanza un promedio anual de más de cuatro veces el promedio de los demás municipios.

TABLA 2: Biomasa residual pecuaria sector bovino (toneladas/año)

Ciudad	Escenario bajo	Escenario Alto	Promedio
Girardot	10.000	50.000	30.000
Flandes	10.000	50.000	30.000
Ricaurte	10.000	50.000	30.000
Coello	50.000	200.000	125.000
Nariño	10.000	50.000	30.000
Total	90.000	400.000	245.000

Fuente: Tabla elaborada por el autor con datos de Unidad de Planeación Minero Energética (UPME), 2010

Finalmente, para la biomasa residual pecuaria, se presenta la producción anual de estiércol proveniente del sector avícola (ver Tabla 3). En este caso, solamente se cuenta con datos de la producción de las ciudades Ricaurte y Nariño, cada una con un promedio anual de producción de 5.000 toneladas.

TABLA 3: Biomasa residual pecuaria sector avícola (toneladas/año)

Ciudad	Escenario bajo	Escenario Alto	Promedio
Girardot	N/A	N/A	-
Flandes	N/A	N/A	-
Ricaurte	0	10.000	5.000
Coello	N/A	N/A	-
Nariño	0	10.000	5.000
Total	0	20.000	10.000

Fuente: Tabla elaborada por el autor con datos de Unidad de Planeación Minero Energética (UPME), 2010

6.3.2 Material orgánico de origen vegetal

De la misma forma, para encontrar el volumen anual de material de origen vegetal disponible se revisaron los mapas de Biomasa residual agrícola. En este caso se analizaron los mapas BIOMASA RESIDUAL AGRICOLA – Cantidad municipal anual de los residuos de cultivos de arroz (ver Anexo G), BIOMASA RESIDUAL AGRICOLA – Cantidad municipal anual de los residuos de cultivos de maíz (ver Anexo H) y BIOMASA RESIDUAL AGRICOLA – Cantidad municipal anual de los residuos de cultivos de plátano (ver Anexo I)

De la misma forma que para el material orgánico de origen animal, según la información contenida en los diferentes mapas, las siguientes tablas ilustran la disponibilidad de material orgánico de origen vegetal en la región donde se ubica la ciudad de Girardot:

En la Tabla 4 se muestra que no hay información relacionada con los residuos de los cultivos de arroz en los municipios de Ricaurte y Coello. Por otro lado, se puede destacar la producción de residuos de cultivos de arroz en el municipio de Flandes en donde alcanza en promedio alrededor de 25.000 toneladas por año.

TABLA 4: Biomasa residual agrícola – residuos de cultivos de arroz (toneladas/año)

Ciudad	Escenario bajo	Escenario Alto	Promedio
Girardot	0	10.000	5.000
Flandes	10.000	40.000	25.000
Ricaurte	N/A	N/A	-
Coello	0	10.000	5.000
Nariño	N/A	N/A	-
Total	10.000	60.000	35.000

Fuente: Tabla elaborada por el autor con datos de Unidad de Planeación Minero Energética (UPME), 2010

La Tabla 5 presenta las cifras relacionadas con los residuos agrícolas provenientes de los cultivos de maíz. En este caso, aunque se tiene unos valores de producción bajos, cuatro de los municipios registran disponibilidad de material orgánico.

TABLA 5: Biomasa residual agrícola – residuos de cultivos de maíz (toneladas/año)

Ciudad	Escenario bajo	Escenario Alto	Promedio
Girardot	0	10.000	5.000
Flandes	N/A	N/A	-
Ricaurte	0	10.000	5.000
Coello	10.000	40.000	25.000
Nariño	0	10.000	5.000
Total	10.000	70.000	40.000

Fuente: Tabla elaborada por el autor con datos de Unidad de Planeación Minero Energética (UPME), 2010

Finalmente, la Tabla 6 muestra los valores del volumen residual agrícola producido en los cultivos de plátano. Según los números presentados se puede observar que existe una gran preferencia por los cultivos de plátano en la región, en especial en el municipio de Flandes en donde se alcanza un promedio anual de 260.00 toneladas de residuos.

TABLA 6: Biomasa residual agrícola – residuos de cultivos de plátano (toneladas/año)

Ciudad	Escenario bajo	Escenario Alto	Promedio
Girardot	10.000	40.000	25.000
Flandes	120.000	400.000	260.000
Ricaurte	10.000	40.000	25.000
Coello	10.000	40.000	25.000
Nariño	10.000	40.000	25.000
Total	160.000	560.000	360.000

Fuente: Tabla elaborada por el autor con datos de Unidad de Planeación Minero Energética (UPME), 2010

Los demás cultivos considerados en el atlas no muestran registro de producción de biomasa residual en las ciudades enmarcadas. Es importante recordar que en la región existen otro tipo de cultivos y de animales pero a menor escala los cuales no están caracterizados en el Atlas del Potencial Energético de la Biomasa Residual en Colombia.

7 CARACTERIZACIÓN DE LA MATERIA ORGÁNICA PARA LA PRODUCCIÓN DE BIOGÁS

Como ya se menciona, la cantidad y calidad del metano producido depende directamente del tipo de sustrato utilizado. En ese orden de ideas, es indispensable conocer las propiedades específicas de los materiales orgánicos disponibles en la región con el fin de identificar la capacidad que tiene cada uno de ellos para producir biogás.

Las características y propiedades de la materia orgánica utilizable para la producción de biogás se obtienen a partir de una consulta bibliográfica, de esta manera se puede conocer datos experimentales producidos en laboratorios o datos reportados de plantas de producción en operación.

Dado que existe una gran cantidad de estudios relacionados con la producción de biogás a partir de diferentes sustratos, se realizó una búsqueda en diversas fuentes con el fin de verificar la consistencia de los datos. La información que se presenta fue adaptada con el fin de facilitar su interpretación. En algunos casos la información no es presentada directamente, así que es necesario realizar algunos cálculos para poder llegar a cifras comparables.

Cuando la información en la fuente de origen se presenta como un rango de valores se calcula el promedio aritmético con el fin de contar con una única cifra que permita calcular de manera directa la capacidad de producción de biogás en la región.

Así mismo, se referencia cada una de las fuentes de información con el fin de entregar al lector la posibilidad de realizar una búsqueda directa de los valores de

capacidad de producción de biogás para cada sustrato, así como conocer de manera específica las calidad de la información utilizada.

Los estudios consultados asumen que la capacidad de producción de biogás para cada tipo de sustrato se realiza bajo procesos de digestión con condiciones promedio similares de temperatura, pH y tiempos de retención entre otras.

7.1 Capacidad del material orgánico animal disponible en la región de la ciudad de Girardot para generar biogás

Como se presentó en el capítulo 6 el material orgánico de origen animal disponible en la región de Girardot corresponde al los residuos (estiércol) producido por la actividad de los sectores porcinos, bovinos y avícolas principalmente. A partir de esta información se realizó una búsqueda bibliográfica de la capacidad de producción de cada uno de estos sustratos, lo cual arrojó los siguientes resultados:

CUADRO 4: Capacidad de producción de biogás de sustratos de origen animal (estiércol solamente) según diferentes autores (Nm³/tonelada)

Fuente	Avícola	Bovino	Porcino
Organic Resource Management Inc.	-	25.00	36.00
OYEWOLE, O. A.	72.20	-	-
Steffen, R.; Szolar, O. and Braun, R.	71.25	17.00	15.47
BIOenergy EXANTAS Tehnologie alimentara	77.20	32.51	27.70
AL SEADI, Teodorita, et al.	76.00	17.00	15.47
Promedio	74.16	22.88	23.66

Fuente: Tabla elaborada por el autor

Según la información recopilada en el Cuadro 4, se puede observar que, a pesar de contar con procesos de producción similares, los valores de la capacidad de generación de biogás de cada sustrato no son constantes. Por esta razón, y con

la intención de unificar los valores para facilitar los cálculos, se realizó un promedio aritmético de las cifras presentadas por cada fuente de información. Estos valores serán utilizados a la hora de estimar el potencial de producción de biogás en la región donde se encuentra la ciudad de Girardot.

7.2 Capacidad del material orgánico vegetal disponible en la región de la ciudad de Girardot

De la misma forma que para la materia orgánica de origen animal, se consideró el material orgánico de origen vegetal disponible en la región de Girardot presentado en el capítulo 6, en este caso se tuvieron en cuenta los residuos de los cultivos de arroz, maíz y plátano. Con esta información se realizó una búsqueda bibliográfica de la capacidad de producción de cada uno de estos sustratos. En el caso del maíz, existe una gran variedad de fuentes de información que presentan datos sobre su capacidad para producir biogás, así mismo, para el arroz es posible encontrar información de diferentes autores, sin embargo, no fue posible encontrar una gran variedad de datos sobre la producción de biogás a partir de residuos agrícolas provenientes de los cultivos de plátano.

El Cuadro 5, presenta los datos de capacidad de producción de biogás a partir de residuos de cultivos de maíz con sus respectivos autores. Así mismo, presenta la estimación del promedio aritmético, el cual es el dato que se utilizara para calcular la capacidad de generación de biogás en la región de Girardot.

CUADRO 5: Capacidad de producción de biogás de residuos de cultivo de maíz según diferentes autores ($\text{Nm}^3/\text{tonelada}$)

Fuente	Capacidad
Ontario Ministry of Agriculture, Food and Rural Affairs	180,00
National Non-Food Crops Centre	210,00
Steffen, R.; Szolar, O. and Braun, R.	202,00
BIOenergy EXANTAS Tehnologie alimentara	180,40
Promedio	193,10

Fuente: Tabla elaborada por el autor

Así mismo, en el Cuadro 6, se pueden observar los datos de capacidad de producción de biogás a partir de residuos de cultivos de arroz y su promedio aritmético.

CUADRO 6: Capacidad de producción de biogás de residuos de cultivos de arroz según diferentes autores (Nm³/tonelada)

Fuente	Arroz
Avfall sverige	356.00
Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO)	352.00
National Non-Food Crops Centre	292.00
Emison	289.00
Promedio	322.25

Fuente: Tabla elaborada por el autor

Finalmente, se ilustra la capacidad de producción de biogás a partir de residuos de cultivos de plátano, en este caso, dada la escasa información sobre este tipo de sustrato, se utiliza la información suministrada por una única fuente. B.T. Nijaguna (2002), quien en su libro ***Biogas Technology***, ilustra que “...un kilogramos de residuos de cultivos de plátano, con un contenido de humedad de 95%, tienen una capacidad de generar de 25 l –30 l de biogás.”

A partir de estos datos es posible determinar la cantidad media de biogás capaz de generar una tonelada de residuos de plátano. Así, se utiliza 27,5 m³/ton como dato para realizar los cálculos.

8 ESTIMACIÓN DEL POTENCIAL DE GENERACIÓN DE BIOGÁS EN LA REGIÓN DEL MUNICIPIO DE GIRARDOT

Una vez conocida la información presentada en los capítulos 6 y 7 es posible determinar el potencial de generación anual de biogás para cada uno de los sustratos. Para esto se presenta la metodología de cálculo, así como, los resultados obtenidos.

Cabe resaltar que al combinar diferentes sustratos es posible obtener diferentes capacidades de producción de biogás, sin embargo, en este trabajo, se estimara una producción de biogás para cada uno de los sustratos de manera independiente.

8.1 Metodología

Para la estimación del potencial de generación de biogás a partir de los residuos orgánicos de origen animal, así como la de la materia vegetal disponible en la región se realiza una operación matemática simple. En este caso el resultado depende de la cantidad anual de cada uno de los sustratos analizados, así como de la capacidad individual de cada uno de ellos para generar biogás.

La siguiente expresión indica la operación matemática para el cálculo de la capacidad de producción de biogás teórica de cada sustrato:

$$Vb \left[Nm^3/año \right] = Ms \left[toneladas/año \right] * Cs \left[Nm^3/tonelada \right]$$

En donde:

- Vb = Volumen de biogás
- Ms = Masa total de sustrato por año

- C_s = Capacidad de generación de biogás del sustrato por año

Así, teniendo en cuenta esta relación se calculan los volúmenes teóricos de producción de biogás según los datos de volumen y capacidad de generación presentados en los capítulos 5 y 6.

8.2 Volumen de producción de biogás en la región de la ciudad de Girardot a partir del material orgánico animal disponible

Los cálculos de capacidad de producción de biogás a partir del material orgánico animal disponible se ilustran a continuación:

(i) Biogás a partir de estiércol de cerdos:

$$M_s = 50.000 \text{ toneladas/año}$$

$$C_s = 23,66 \text{ Nm}^3/\text{tonelada}$$

$$V_b = 50.000 \text{ toneladas/año} * 23,66 \text{ Nm}^3/\text{tonelada}$$

$$V_b = 1'183.000 \text{ Nm}^3/\text{año}$$

(ii) Biogás a partir de estiércol de bovinos

$$M_s = 245.000 \text{ toneladas/año}$$

$$C_s = 22,80 \text{ Nm}^3/\text{tonelada}$$

$$V_b = 245.000 \text{ toneladas/año} * 22,80 \text{ Nm}^3/\text{tonelada}$$

$$V_b = 5'586.000 \text{ Nm}^3/\text{año}$$

(iii) Biogás a partir de estiércol de aves

$$M_s = 10.000 \text{ toneladas/año}$$

$$Cs = 74,16 \text{ Nm}^3/\text{tonelada}$$

$$Vb = 10.000 \text{ toneladas/año} * 74,16 \text{ Nm}^3/\text{tonelada}$$

$$Vb = 741,600 \text{ Nm}^3/\text{año}$$

8.3 Volumen de producción de biogás en la región de la ciudad de Girardot a partir del material orgánico vegetal disponible

De la misma forma, a continuación se presentan los cálculos de la capacidad de producción de biogás a partir del material orgánico vegetal disponible en la región:

(i) *Biogás a partir de residuos de cultivos de maíz*

$$Ms = 40.000 \text{ toneladas/año}$$

$$Cs = 193,10 \text{ Nm}^3/\text{tonelada}$$

$$Vb = 40.000 \text{ toneladas/año} * 193,10 \text{ Nm}^3/\text{tonelada}$$

$$Vb = 7'724.000 \text{ Nm}^3/\text{año}$$

(ii) *Biogás a partir de residuos de cultivos de arroz*

$$Ms = 35.000 \text{ toneladas/año}$$

$$Cs = 322,25 \text{ Nm}^3/\text{tonelada}$$

$$Vb = 35.000 \text{ toneladas/año} * 322,25 \text{ Nm}^3/\text{tonelada}$$

$$Vb = 11'278.750 \text{ Nm}^3/\text{año}$$

(iii) *Biogás a partir de residuos de cultivos de plátano*

$$Ms = 360.000 \text{ toneladas/año}$$

$$Cs = 27,5 \text{ Nm}^3/\text{tonelada}$$

$$Vb = 360.000 \text{ toneladas/año} * 27,5 \text{ Nm}^3/\text{tonelada}$$

$$Vb = 9'900.000 \text{ Nm}^3/\text{año}$$

8.4 Resumen de capacidad de producción de biogás

Como resultado de los cálculos realizados, se presenta la Tabla 7 la cual ilustra un resumen con la capacidad de producción de cada sustrato, así como el agregado del volumen.

TABLA 7: Capacidad de producción de biogás de según el sustrato utilizado

Sustrato	Volumen (Nm³/año)
Estiércol de cerdos	1.183.000
Estiércol de bovinos	5.586.000
Estiércol de aves	741.600
Residuos de cultivos de maíz	7.724.000
Residuos de cultivos de arroz	11.278.750
Residuos de cultivos de plátano	9.900.000
Total	36.413.350

Fuente: Tabla elaborada por el autor

Según los resultados obtenidos, en la ciudad de Girardot (incluyendo las ciudades aledañas) se puede producir (teóricamente) 36'413.350 Nm³/año de biogás.

8.5 Contenido energético del biogás producido

Ahora bien, al conocer la capacidad de producción de biogás a partir de cada uno de los diferentes sustratos, es posible estimar el contenido energético del biogás producido. Para esto se considera que la información presentada en el Cuadro 2 y el Cuadro 3, los cuales muestran que la proporción promedio de metano (CH₄) en el

biogás es de 65% mientras que un biogás enriquecido al 97% de metano (CH_4) puede alcanzar un contenido energético $9,67 \text{ kWh/Nm}^3$.

En la Tabla 8 se presentan los valores obtenidos de la estimación del equivalente energético de la capacidad de producción de biogás, donde se puede destacar el aporte energético del biogás obtenido a partir de e residuos de cultivos de arroz y de residuos de cultivos de plátano.

TABLA 8: Contenido energético de la capacidad de producción de biogás

Sustrato	Volumen de metano (Nm³/año)	Equivalente energético (kWh/año)
Estiércol de cerdos	768.950	7.435.747
Estiércol de bovinos	3.630.900	35.110.803
Estiércol de aves	482.040	4.661.327
Residuos de cultivos de maíz	5.020.600	48.549.202
Residuos de cultivos de arroz	7.331.188	70.892.583
Residuos de cultivos de plátano	6.435.000	62.226.450
Total	23.668.678	228.876.112

Fuente: Tabla elaborada por el autor

9 ANÁLISIS DE RESULTADOS

Diversos datos se obtuvieron en el proceso de identificación de la capacidad de generación de biogás en la región donde se ubica la ciudad de Girardot. A continuación se ilustra la participación de cada una de las fuentes de materia orgánica en el total de la capacidad estimada

En primer lugar, al conocer la capacidad de producción de las diferentes fuentes de materia orgánica es posible determinar que, dado a que existe una mayor disponibilidad de sustratos de origen vegetal y a que su capacidad de producción por unidad es mayor, el volumen de biogás obtenido a partir de los residuos de cultivos supera la capacidad de producción de los residuos de origen animal

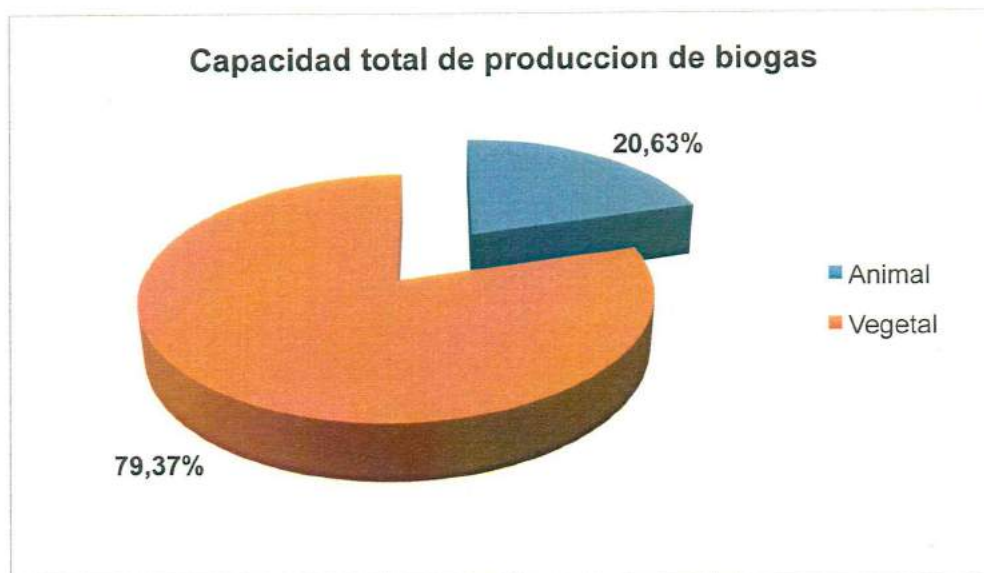
En la Tabla 9 se puede observar que la producción de biogás a partir de material orgánico vegetal es mas de 3.8 veces mayor que la capacidad de producción a partir de residuos orgánicos de origen animal.

TABLA 9: Capacidad de producción de biogás según el origen de del material orgánico

Origen del material orgánico	Capacidad de producción (Nm³/año)
Animal	7,510,600
Vegetal	28,902,750
Total	36,413,350

Fuente: Tabla elaborada por el autor

Esta diferencia se puede observar en la proporción mostrada en la Grafica 5, la cual ilustra que cerca del 80% de la capacidad de producción total de biogás en la región del municipio de Girardot corresponde al generado a partir de material orgánico de origen vegetal



GRAFICA 5: Distribución de la capacidad total de producción de biogás en función del origen de la materia orgánica.

Fuente: Grafica elaborada por el autor

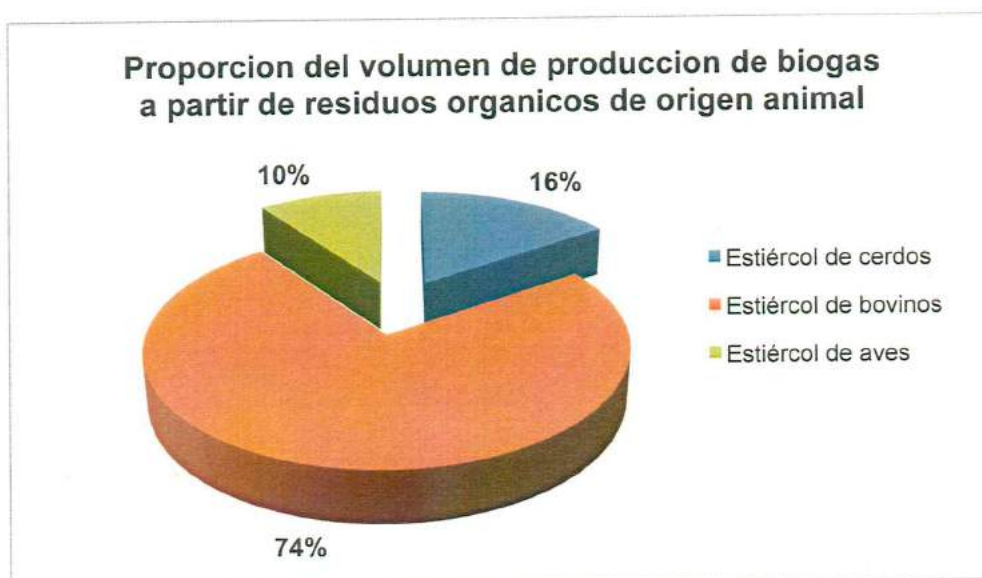
En relación a la producción de biogás a partir de estiércol animal, se puede observar en la Tabla 10 que los desechos provenientes de bovinos tiene la mayor capacidad de producción, tanto en volumen como en contenido energético, seguido por la capacidad de producción de biogás a partir del estiércol de cerdos

TABLA 10: Producción de biogás (metano (CH₄) al 65%) en función del sustrato de origen animal utilizado y su equivalente energético

Sustrato	Volumen (Nm ³)	Equivalente energético (kWh)
Estiércol de cerdos	1.183.000	7.435.747
Estiércol de bovinos	5.586.000	35.110.803
Estiércol de aves	741.600	4.661.327
Total	7.510.600	47.207.876

Fuente: Tabla elaborada por el autor

Así mismo, al analizar la proporción de participación de la generación de biogás a partir de los residuos de animales (ver Grafica 6), se puede observar que el estiércol de bovinos aporta el 74% de la producción total, seguido por la producción de biogás a partir de estiércol de cerdos con un 16% y finalizando con la capacidad de producción a partir de los desechos generados por las aves (pollo en su mayoría) con 10% del total.



GRAFICA 6: Distribución de la capacidad de producción de biogás a partir de residuos orgánicos de origen animal.

Fuente: Grafica elaborada por el autor

Finalmente, al observar los resultados del volumen de producción de biogás a partir de material orgánico de origen vegetal, se encontró que la capacidad de generación de los residuos de cultivos de arroz es el que genera tanto un mayor volumen de gas así como representar el mayor equivalente energético de todos los sustratos comparados en el estudio.

Al volumen de producción de biogás a partir de residuos de cultivos de arroz, en la región del municipio de Girardot, le sigue la producción de biogás a partir de residuos de cultivos de plátano y finalmente el volumen de producción de biogás proveniente de los cultivos de maíz (ver Tabla 11). Para todos los sustratos de

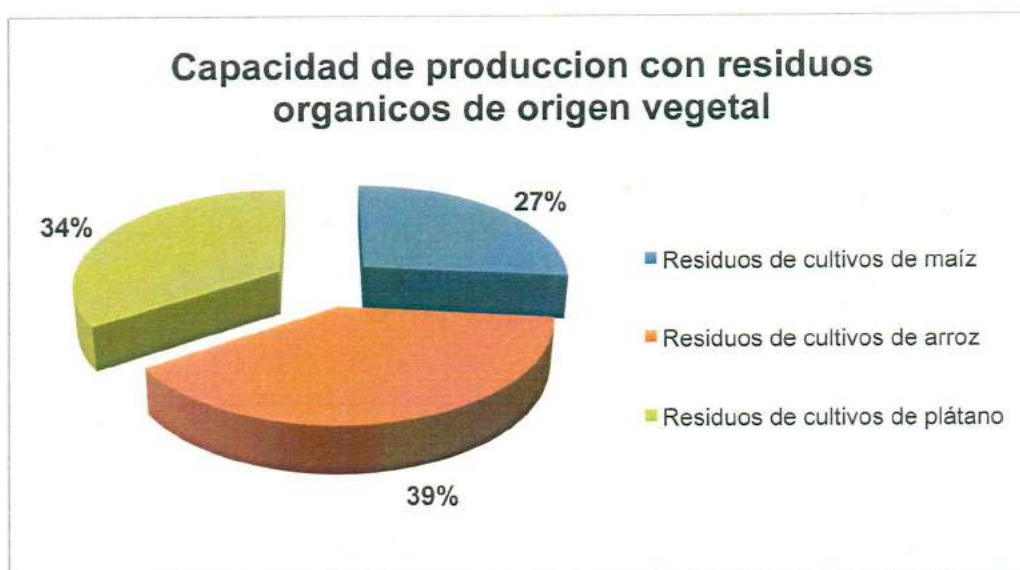
origen vegetal la producción de biogás es superior que la de los sustratos provenientes de estiércol de animales, por ende el volumen de energía es mayor.

TABLA 11: Producción de biogás a en función del sustrato de origen vegetal utilizado

Sustrato	Volumen (Nm ³)	Equivalente energético (kWh)
Residuos de cultivos de maíz	7.724.000	48.549.202
Residuos de cultivos de arroz	11.278.750	70.892.583
Residuos de cultivos de plátano	9.900.000	62.226.450
Total	28.902.750	181.668.235

Fuente: Tabla elaborada por el autor

La Grafica 7 presenta la distribución de capacidad de producción de biogás entre los sustratos de origen vegetal. Se puede observar que la capacidad de producción es dominada por los cultivos de arroz con alrededor de 40%, mientras que los cultivos de plátano y maíz tienen un porcentaje de producción similar respecto al total de 34% y 27% respectivamente.



GRAFICA 7: Distribución de la capacidad de producción de biogás a partir de residuos orgánicos de origen vegetal

Fuente: Grafica elaborada por el autor

Teniendo en cuenta el volumen de biogás generado y el contenido de energía presentado en la Tabla 10 y la Tabla 11, se puede concluir que existe un potencial de aprovechamiento energético, a partir de producción de biogás, de los residuos presentados de más de 45.000 MWh/año para el caso de los residuos provenientes de materia orgánica animal y de más de 180.000 MWh/año para los provenientes de la materia orgánica de origen vegetal, para un total de más de 225.000 MWh/año.

De esta forma, y teniendo en cuenta la demanda de la región Huila - Tolima de gas natural, es posible suministrar (teóricamente y con las cantidades de biomasa analizadas) con la capacidad de producción de biogás encontrada cerca del 18% del total a consumir en el año 2013.

10 CONCLUSIONES

Con la caracterización del sistema de producción de biogás es posible concluir que la digestión anaeróbica es un proceso simple, de fácil implementación y que cuenta con un gran desarrollo técnico que ha permitido construir centrales de producción de altísima eficiencia

Igualmente, se pudo confirmar que el biogás es un combustible versátil, de fácil utilización y con un gran contenido energético el cual puede ser utilizado para satisfacer las necesidades de diversas poblaciones sin tener que realizar grandes modificaciones a los sistemas existentes.

Dada la gran variedad de tamaños de bio-digestores y a su versatilidad, es posible implementar proyectos de biogás de diversas escalas, con bajos presupuestos y en lugares de difícil acceso, así como sistemas complejos de grandes capacidades.

Al analizar las condiciones ambientales de Girardot, es posible concluir que la ciudad cuenta con las condiciones climáticas adecuadas para implementar procesos de producción de biogás, ya que la temperatura promedio se ubica dentro del rango óptimo de operación de las bacterias mesófilas.

Con el análisis del balance de residuos de material orgánico disponible para la producción de biogás, es posible concluir que existe suficiente materia prima disponible en la región de la ciudad de Girardot para alimentar una planta de producción de biogás con una capacidad teórica de más de 36'000.000 Nm³/año lo que equivale a cerca de 225.000 MWh/año

Así mismo, se puede concluir que es mucho más representativo la capacidad de producción de biogás a partir de residuos orgánicos de origen vegetal que de la de los desechos de origen animal, en especial la participación en la capacidad de producción de biogás de los residuos de cultivos de arroz

A pesar de que la mayor capacidad de producción de biogás proviene de materia orgánica de origen vegetal, es importante evaluar la facilidad de utilizar dichos sustratos en el proceso de bio-digestión

Al revisar las proyecciones de demanda de gas natural en la región Huila – Tolima y al confrontarlo con la energía contenida en el biogás producido, es posible afirmar que el biocombustible logra aportar una gran porción de las necesidades de energéticas de la región tanto en el sector residencial como comercial. Los sustratos de origen de animal lograrían aportar cerca del 3.60% de la demanda actual mientras los sustratos de origen vegetal tiene la capacidad de producir cerca del 14.40%, para un aporte total aproximado del 18.00%

Finalmente, es importante mencionar que la seguridad de las instalaciones de producción de biogás debe prevalecer sobre cualquier otro tipo de beneficio o interés de los inversionistas.

11 TRABAJOS FUTUROS

En primer lugar es necesario identificar soluciones y esquemas de logística que garanticen el abastecimiento de la materia prima desde los diferentes centros de producción hasta la posible planta de producción. Dichas metodologías deben garantizar que la producción sea eficiente desde el punto de vista económico así como ambiental y energético

De la misma forma, es importante realizar un análisis que permita identificar las barreras e incentivos relacionados con la producción de biogás, tanto del punto de vista regulatorio, financiero y ambiental, a nivel local, regional y nacional, así como proponer soluciones a las restricciones que permitan materializar un proyecto de tal forma que no comprometan su viabilidad ni sostenibilidad.

Revisar otras fuentes de biomasa residual disponible en la región tales como cultivos de menor escala que no están caracterizados en el Atlas de Biomasa Residual así como ampliar el área de recolección de material orgánico a otros municipios cercanos.

Igualmente, con el ánimo de refinar los cálculos y obtener datos más cercanos a la realidad, se recomienda identificar experimentalmente las propiedades de cada uno de los sustratos disponibles en la región ya que los valores utilizados en el estudio corresponden a datos promedios de literatura. Cabe recordar que las características y composición química de cada tipo de residuos orgánico pueden variar considerablemente por diversos factores.

Con la identificación plena de las propiedades de cada uno de los sustratos, es posible plantear el análisis de co-digestión de los sustratos disponibles en diversas

proporciones. Según la bibliografía, en algunos casos, al mezclar más de un tipo de sustrato, es posible obtener mayores capacidades de producción con la misma cantidad de materia prima, así como biogás con un mayor contenido de metano (CH₄)

Así mismo, al conocer los valores teóricos de la capacidad de producción de biogás en la región de Girardot, es posible realizar el análisis financiero para la implementación de proyectos, esto con el fin de garantizar la viabilidad de la inversión.

De la misma forma, es necesario realiza un análisis que permita estimar el porcentaje real de residuos orgánicos utilizable ya que los datos presentados, ilustran el total de biomasa residual disponible en cada zona, pero no consideran otros factores que impidan su uso total (ej. transporte, consideraciones técnicas, impactos ambientales, restricciones sociales, etc.)

Dado que los mapas presentan una gran disponibilidad de materia orgánica en otras regiones del país, se propone realizar ejercicios análisis de potencial de producción de biogás en otras ciudades de tal forma que las investigaciones ayuden a determinar la viabilidad de implementación bio-digestores en otras regiones del país

REFERENCIAS

Avfall Sverige. **Biogas from lignocellulosic biomass**, 2012. Referencia disponible en: <<http://www.avfallsverige.se/fileadmin/uploads/Rapporter/U2012-07.pdf>> Acceso en: Diciembre 2012

AL SEADI, Teodorita, et al. **Biogas Handbook**, 2008. Referencia disponible en: <<http://www.lemvigbiogas.com/BiogasHandbook.pdf>> Acceso en: Enero 2013

Alcaldía de Girardot website. **Nuestro municipio, Mapas, Girardot en el departamento**, 2008. Referencia disponible en: <<http://girardot-cundinamarca.gov.co/nuestromunicipio.shtml?apc=mlxx-1-&m=m#El municipio en el departamento>> Acceso en: Noviembre de 2012

Alcaldía de Girardot website. **Nuestro municipio, Mapas, Girardot en el país**, 2009. Referencia disponible en: <<http://girardot-cundinamarca.gov.co/nuestromunicipio.shtml?apc=mmxx-1-&m=m#El municipio en el país>> Acceso en Noviembre de 2012

Alcaldía de Girardot website. **Nuestro municipio, Informacion general**, 2012. Referencia disponible en: <<http://girardot-cundinamarca.gov.co/nuestromunicipio.shtml?apc=mixx-1-&m=f>> Acceso en: Noviembre de 2012

Baltic Biogas Bus Project website. **About Biogas**, 2009. Referencia disponible en: <<http://www.balticbiogasbus.eu/web/about-biogas.aspx>> Acceso en: Diciembre de 2012

BIOenergy EXANTAS Tehnologie alimentara website. **In biogas yield of organic substances**. Referencia disponible en: <<http://bioenergy.exantas.ro/pages.php?page=randament>> Acceso en: Enero 2013

Colombia Vive website. **Mapa Político de Colombia**, 2011. Referencia Disponible en: <<http://colombiavive.wordpress.com/politica-de-colombia/mapa-politico-de-colombia/>> Acceso en: Enero 2013

Corporación Autónoma Regional (C.A.R.) (A) website. **Mapa estaciones hidrometeorológicas activas**, 2012. Referencia disponible en: <<http://www.car.gov.co/?idcategoria=21094>> Acceso en: Noviembre de 2012

Corporación Autónoma Regional (C.A.R.) (B) website. **Valores medios mensuales de temperatura**, 2012. Referencia disponible en: <<http://www.car.gov.co/?idcategoria=1393>> Acceso en: Noviembre de 2012

Corporación Autónoma Regional (C.A.R.) (C) website. **Precipitación totales mensuales**, 2012. Referencia disponible en: <<http://www.car.gov.co/?idcategoria=1395>> Acceso en: Noviembre de 2012

Departamento Administrativo Nacional de Estadística (DANE) website. **Proyecciones de población, Estimaciones y proyecciones de población**. Referencia disponible en: <http://www.dane.gov.co/index.php?option=com_content&view=article&id=75&Itemid=72> Acceso en: Octubre de 2012

Emison website. **Producción biogás**. Referencia disponible en: <<http://www.emison.com/produccion%20biogas.htm>> Acceso en: Enero 2013

Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC) website. **Departamento de Cundinamarca – División Política Administrativa**, 2012, Referencia disponible en: <http://geoportal.igac.gov.co/mapas_de_colombia/igac/mps_politico_admon_dptales/Cundinamarca_2012.pdf> Acceso en: Diciembre 2012

Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC) website. **Departamento del Tolima – División Política Administrativa**, 2012, Referencia disponible en: <http://geoportal.igac.gov.co/mapas_de_colombia/igac/mps_politico_admon_dptales/Tolima_2012.pdf> Acceso en: Diciembre 2012

International Energy Agency (IEA) – Bioenergy. **100% BIOGAS FOR URBAN TRANSPORT IN LINKÖPING, SWEDEN**, 2007. Referencia disponible en: <http://www.iea-biogas.net/download/linkoping_final.pdf> Acceso en: Octubre 2012

International Energy Agency (IEA) – Bioenergy. **Biogas upgrading technologies – developments and innovations**, 2009. Referencia disponible en: <http://www.iea-biogas.net/download/publi-task37/upgrading_rz_low_final.pdf> Acceso en: Octubre 2012

Naskeo Environnement – Biogas Renewable Energy website. **Biogas Compstion**, 2009. Referencia disponible en:<http://www.biogas-renewable-energy.info/biogas_composition.html> Acceso en: Enero 2013

National Non-Food Crops Centre. **Anaerobic digestión – Biogas yields**. Referencia disponible en:<<http://www.biogas-info.co.uk/index.php/biogas-yields.html>> Acceso en: Enero 2013

Nijaguna, B.T. **Biogas Technology**, 2002.

Ontario Ministry of Agriculture, Food and Rural Affairs website. **Energy Yields from a Farm-Based Anaerobic Digestion System**, 2011. Referencia disponible en:<<http://www.omafra.gov.on.ca/english/engineer/facts/enyields.htm>> Acceso en: Enero 2013

Organic Resource Management Inc. website. **Feedstock Quality**, 2013. Referencia disponible en:<http://www.ormi.com/ormi/p/16/Feedstock_Quality/205> Acceso en: Enero 2013

Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO). **Manual de biogás**, 2011 Referencia disponible en:<http://www.rlc.fao.org/fileadmin/content/publicaciones/manual_biogas.pdf> Acceso en: Septiembre 2012

OYEWOLE, O. A. **Biogas production from chicken droppings**, 2010. STEFFEN, R.; SZOLAR, O.; BRAUN, R. **Feedstocks for Anaerobic Digestion**, 1998. Referencia disponible en:<http://www.adnett.org/dl_feedstocks.pdf> Acceso en: Enero 2013

Tekniska Verken website, **Pressrum - Biogasbussarna är nu igång i Motala och Norrköping**, 2011. Referencia disponible en: <<http://www.tekniskaverken.se/sb/pressrum/nyheter/2011/6/biogasbussarna-ar-nu-igang-i-motala-och-/index.xml>> Acceso en: Noviembre 2012

Swedish Biogas International website. **About biogas – Production**, 2012. Referencia disponible en:<<http://www.swedishbiogas.com/us/about-biogas/production>> Acceso en: Octubre 2012

Swedish Gas Association – Energigas Sverige. **English summary of the Swedish website Biogasportalen.se**, Marzo 2011. Referencia disponible en:<<http://www.biogasportalen.se/In-English>> Acceso en: Octubre 2012

TORRES GUILLÉN, Diego; ARTEAGA CHÁVEZ, Luis. **Desarrollo de un Sistema de Biodigestores y Energías Limpias**, 2009

Unidad de Planeación Minero Energética (UPME). **Proyecciones de Demanda de Gas Natural Sector Residencial y Comercial**, 2004. Referencia disponible en:<http://www.sipg.gov.co/sipg/documentos/proyeccion_demanda_GN_Residencial_oct2004.pdf> Acceso en: Noviembre 2012

Unidad de Planeación Minero Energética (UPME). **Atlas del Potencial Energético de la Biomasa Residual en Colombia**, 2010. Referencia disponible en:<<http://www.si3ea.gov.co/Home/Biomasa/tabid/76/language/es-CO/Default.aspx>> Acceso en: Noviembre 2012

Unidad de Planeación Minero Energética (UPME). **Informe Mensual de Evolución de variables de generación**, 2012. Referencia disponible en:<<http://www.siel.gov.co/portals/0/Boletin%20UPME%20Julio%202012.pdf>> Acceso en: Noviembre 2012

ANEXO A – HISTORICO DE TEMPERATURA (°C)

C.A.R. - CORPORACIÓN AUTÓNOMA REGIONAL DE CUNDINAMARCA												
SICLICA - Sistema de Información Climatológica e Hidrológica												
VALORES MEDIOS MENSUALES DE TEMPERATURA (°C)										ESTACIÓN :		
										2120644 ARGELIA		
Latitud	0419 N	X=N=974200	Departamento		CUNDINAMARCA	Corriente		R. BOGOTÁ	CP			
Longitud	7441 W	Y=E=925400	Municipio	RICAURTE	Cuenca	R. BOGOTÁ	Fecha Instalación		ene-91			
Elevación	320 m.s.n.m		Oficina Provincial	3 ALTO MAGDALENA			Fecha Suspensión					
AÑO	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
1992	29.6	30.4	31.0	29.8	28.1	29.5	29.3	31.3	30.3	30.3	25.6	26.6
1993	26.4	27.1	27.0	27.1	27.0	28.4	29.6	30.3	27.9	-	-	-
1994	-	26.4	26.4	26.4	25.7	-	-	29.3	-	-	-	-
1995	-	-	-	26.0	26.8	26.7	27.2	27.9	30.5	27.6	26.1	26.1
1996	26.8	27.8	27.9	27.5	27.6	27.1	27.9	30.1	-	26.1	26.8	27.7
1997	29.0	28.0	-	26.8	28.0	27.5	29.2	30.6	29.1	29.1	27.8	29.5
1998	29.7	29.4	29.7	27.3	27.1	-	-	-	24.9	24.8	23.5	27.4
1999	27.3	27.4	28.0	26.0	26.0	25.6	26.7	28.5	26.4	25.6	26.5	26.8
2000	28.4	27.8	27.4	26.8	26.6	26.2	27.9	29.3	27.1	27.6	27.3	28.6
2001	29.4	28.8	26.1	27.6	27.2	28.1	28.5	29.9	28.7	28.0	27.6	27.4
2002	30.1	30.3	29.1	26.4	28.0	27.1	28.2	32.9	29.7	28.7	27.0	28.4
2003	30.4	30.7	29.2	28.4	29.1	27.8	28.6	31.1	28.8	25.9	25.3	27.3
2004	27.9	28.1	28.6	27.6	27.8	29.3	28.4	29.5	29.7	29.3	29.9	30.2
2005	30.2	31.0	31.1	30.8	28.0	28.6	29.6	30.4	30.9	28.2	28.1	28.8
2006	35.7	35.7	30.8	30.1	29.8	30.0	31.0	30.6	29.5	29.8	30.3	26.8
2007	30.8	32.0	28.7	26.6	-	-	29.6	28.3	29.1	29.3	29.0	29.4
2008	29.4	29.6	30.2	25.2	24.1	24.4	24.8	23.9	25.1	23.4	23.4	23.5
2009	24.1	24.6	24.5	24.7	24.5	25.2	26.6	26.8	27.3	26.7	25.3	26.0
2010	25.9	28.2	28.6	24.8	26.1	25.8	26.6	30.0	30.2	29.9	27.8	27.0
2011	28.5	27.8	28.1	28.9	28.5	27.0	30.5	27.4	25.9	27.0	27.2	27.3
2012	28.3	28.4	28.7	28.8	-	-	-	-	-	-	-	-
Promedio	28.87	29.01	28.47	27.24	27.16	27.31	28.34	29.37	28.39	27.63	26.92	27.49
Maximo	35.70	35.70	31.10	30.80	29.80	30.00	31.00	32.90	30.90	30.30	30.30	30.20
Minimo	24.10	24.60	24.50	24.70	24.10	24.40	24.80	23.90	24.90	23.40	23.40	23.50
DesvStd	2.47	2.40	1.78	1.68	1.45	1.57	1.56	1.97	1.88	1.92	1.88	1.55

Fuente: Tabla elaborada por el autor con datos de Corporación Autónoma Regional (C.A.R.) (B), 2012

ANEXO B – HISTORICO DE PRECIPITACION (MM/M2)

C.A.R. - CORPORACIÓN AUTÓNOMA REGIONAL DE CUNDINAMARCA												
SICLICA - Sistema de Información Climatológica e Hidrológica												
ESTACIÓN : 2120181 POZO AZUL												
VALORES TOTALES MENSUALES DE PRECIPITACIÓN (mm)												
Latitud	04 19 N	X=N=969200	Departamento	CUNDINAMARCA	Corriente	R. BOGOTÁ	PG	ene-89	ene-89	ene-89		
Longitud	74 49 W	Y=E=917550	Municipio	GIRARDOT	Cuenca	R. BOGOTÁ	Fecha Instalación	Fecha Suspensión	Fecha Instalación	Fecha Suspensión		
Elevación	450 m.s.n.m		Oficina Provincial	3 ALTO MAGDALENA								
ANO	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Agosto	Sep	Oct	Nov	Dic
1989	-	-	-	1.5	76.8	76.8	36.6	9.2	106.9	139.7	9.0	30.1
1990	11.8	90.5	108.6	189.5	72.4	25.9	52.7	26.4	96.1	309.5	-	40.0
1991	35.4	16.2	101.9	182.9	178.5	118.1	35.7	14.8	180.4	14.4	135.0	42.0
1992	8.0	22.0	18.7	100.6	123.7	1.3	9.8	15.9	258.3	52.8	85.6	24.0
1993	137.9	87.9	81.6	323.9	50.5	10.6	-	22.0	94.6	127.2	200.1	152.1
1994	135.0	7.5	198.8	164.0	204.9	9.8	39.0	2.9	77.6	62.0	78.0	45.0
1995	4.0	7.9	53.2	150.6	140.9	132.7	207.5	81.4	126.0	137.7	67.2	102.3
1996	52.5	39.2	179.2	150.9	155.3	53.5	80.8	109.2	115.0	120.5	184.8	46.7
1997	-	66.5	84.2	188.2	56.8	85.9	0.0	1.0	83.4	154.0	71.9	92.1
1998	21.8	80.4	125.9	374.5	288.2	27.1	15.1	13.6	154.0	208.0	12.0	29.9
1999	68.9	255.3	29.1	235.3	30.6	137.8	14.3	48.3	144.6	226.6	70.5	69.7
2000	12.0	133.7	77.1	255.6	121.4	171.4	8.0	21.1	257.1	322.5	58.4	81.9
2001	78.9	151.0	238.1	132.1	177.5	16.8	76.8	0.0	61.7	115.6	183.5	60.1
2002	18.0	50.2	181.0	236.6	124.6	81.5	67.8	49.9	89.4	182.1	34.4	96.1
2003	0.7	67.1	120.0	24.6	-	-	0.0	8.5	74.6	224.8	166.5	46.2
2004	40.7	108.3	68.3	127.1	234.0	30.4	71.2	21.6	65.4	56.3	70.7	0.0
2005	75.4	79.1	75.4	49.4	176.7	20.3	10.8	2.9	57.2	270.6	142.8	52.6
2006	11.5	115.1	210.7	36.8	75.4	48.0	20.9	4.6	37.4	32.0	69.2	6.5
2007	72.4	0.0	158.7	165.5	221.2	10.8	87.7	17.5	57.9	141.2	113.6	7.5
2008	127.5	122.0	128.6	177.6	-	109.1	28.0	215.4	174.6	112.3	103.5	42.3
2009	124.4	27.5	70.9	138.3	98.3	47.9	2.5	46.6	125.5	49.0	101.3	154.8
2010	32.9	21.7	51.7	507.1	232.7	75.0	190.6	17.0	67.3	70.4	112.4	49.1
2011	3.0	177.6	158.9	93.2	80.0	15.5	60.4	17.6	54.0	111.7	116.0	37.8
2012	51.7	74.3	102.7	221.6	44.4	18.5	17.1	-	-	-	-	-
Promedio	51.08	78.58	114.57	174.17	139.16	59.37	50.74	33.37	111.26	140.91	96.38	56.90
Maximo	137.90	255.30	238.10	507.10	286.20	171.40	207.50	215.40	258.30	322.50	200.10	154.80
Minimo	0.70	0.00	18.70	1.50	30.60	1.30	0.00	0.00	37.40	14.40	9.00	0.00
DesvStd	46.97	63.70	60.89	115.47	70.79	49.22	55.65	47.76	60.42	86.43	53.25	40.76

Fuente: Tabla elaborada por el autor con datos de Corporación Autónoma Regional (C.A.R.)

(C), 2012

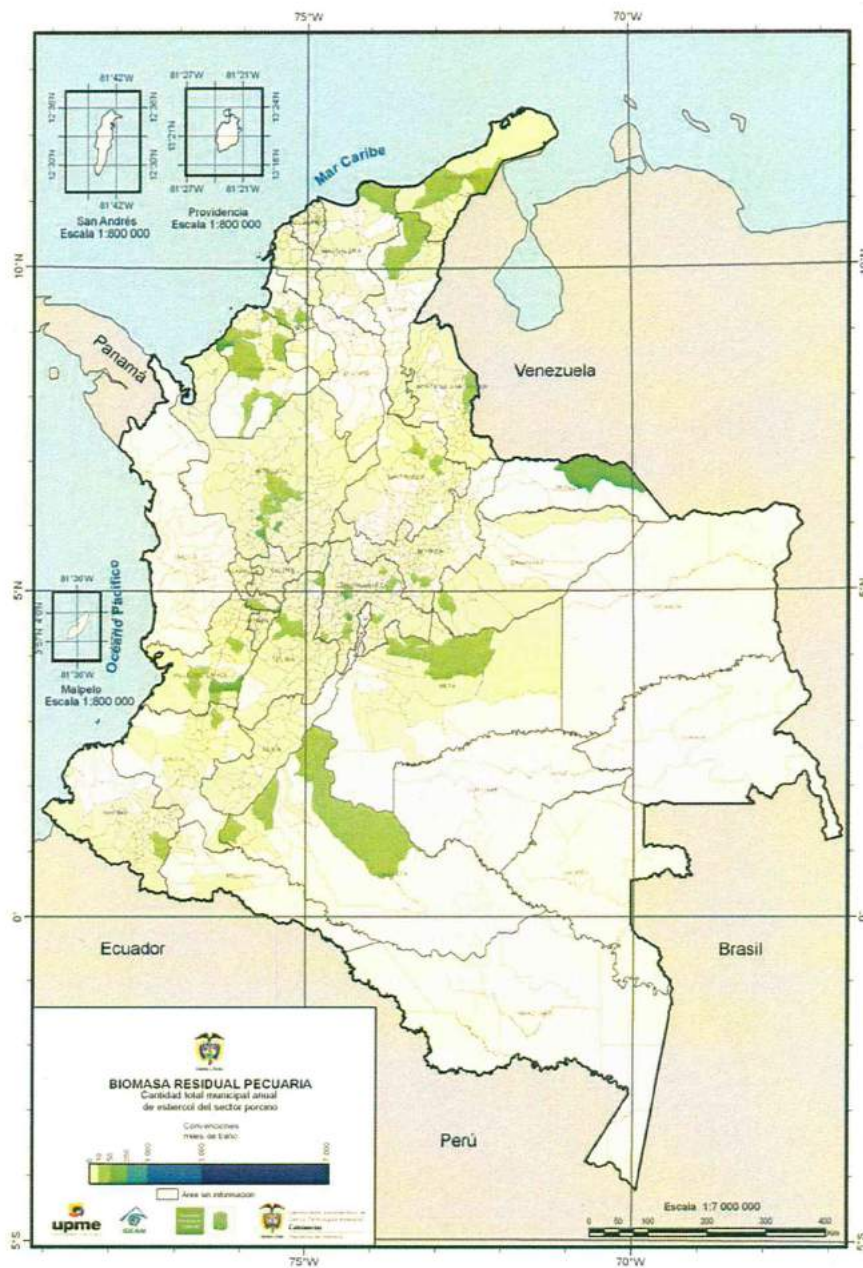
ANEXO C – PROYECCIONES DE DEMANDA DE GAS NATURAL EN LOS DEPARTAMENTOS DE HUILA Y TOLIMA

CUADRO 7: Proyecciones de demanda de gas natural de los departamentos de Huila y Tolima

AÑO	Residencial (MPCD)	Comercial (MPCD)	Total (MPCD)
2004	6,4	0,3	6,7
2005	6,6	0,4	7
2006	7,2	0,5	7,7
2007	7,6	0,6	8,2
2008	7,9	0,7	8,6
2009	8,3	0,7	9
2010	8,6	0,8	9,4
2011	8,8	0,9	9,7
2012	9,1	0,9	10
2013	9,3	1	10,3
2014	9,5	1	10,5
2015	9,6	1,1	10,7
2016	9,8	1,1	10,9
2017	10	1,1	11,1
2018	10,1	1,2	11,3
2019	10,3	1,2	11,5
2020	10,4	1,2	11,6
2021	10,6	1,3	11,9
2022	10,8	1,3	12,1
2023	11	1,3	12,3

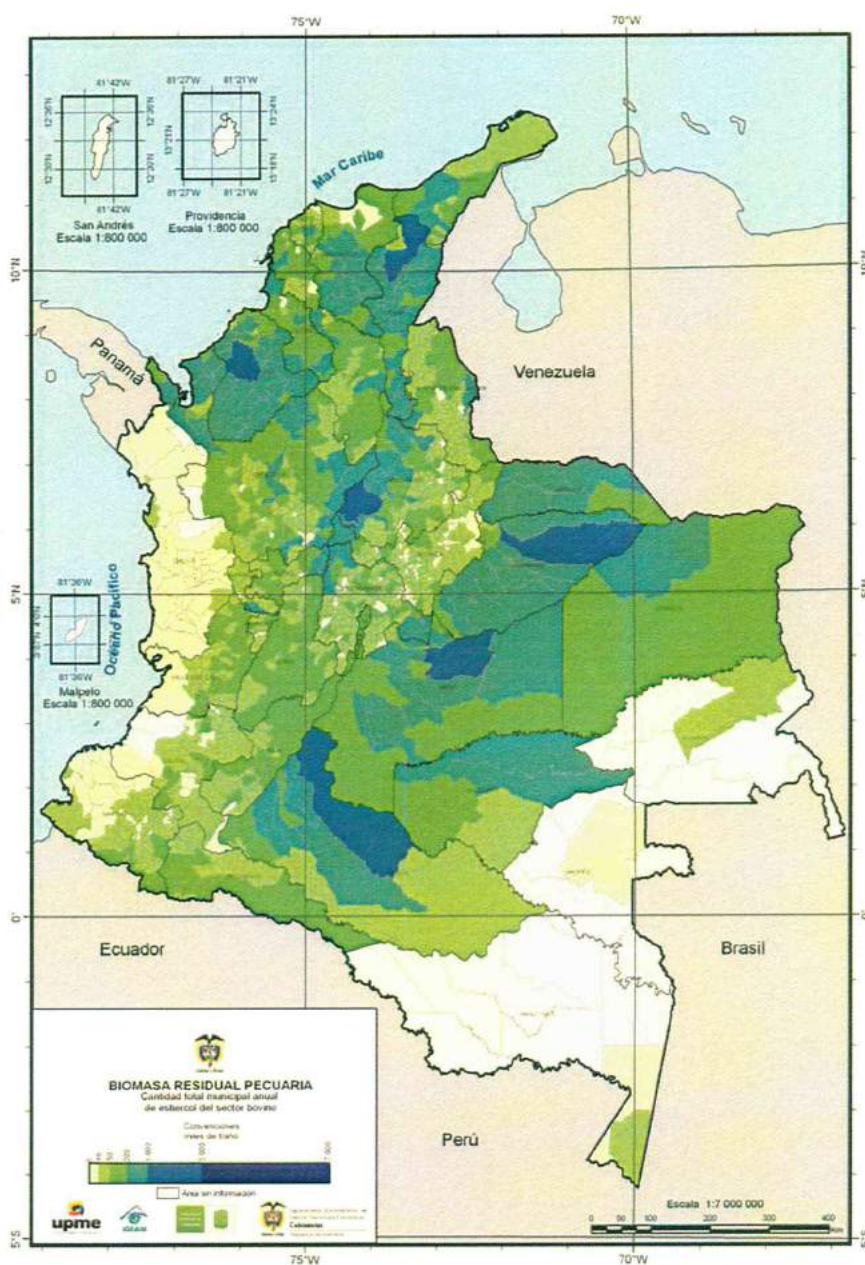
Fuente: Cuadro elaborado por el autor con datos adaptados de la Unidad de Planeación Minero Energética (UPME), 2004

ANEXO D – MAPA DE BIOMASA RESIDUAL PECUARIA (SOLO ESTIERCOL) – SECTOR PORCIONO



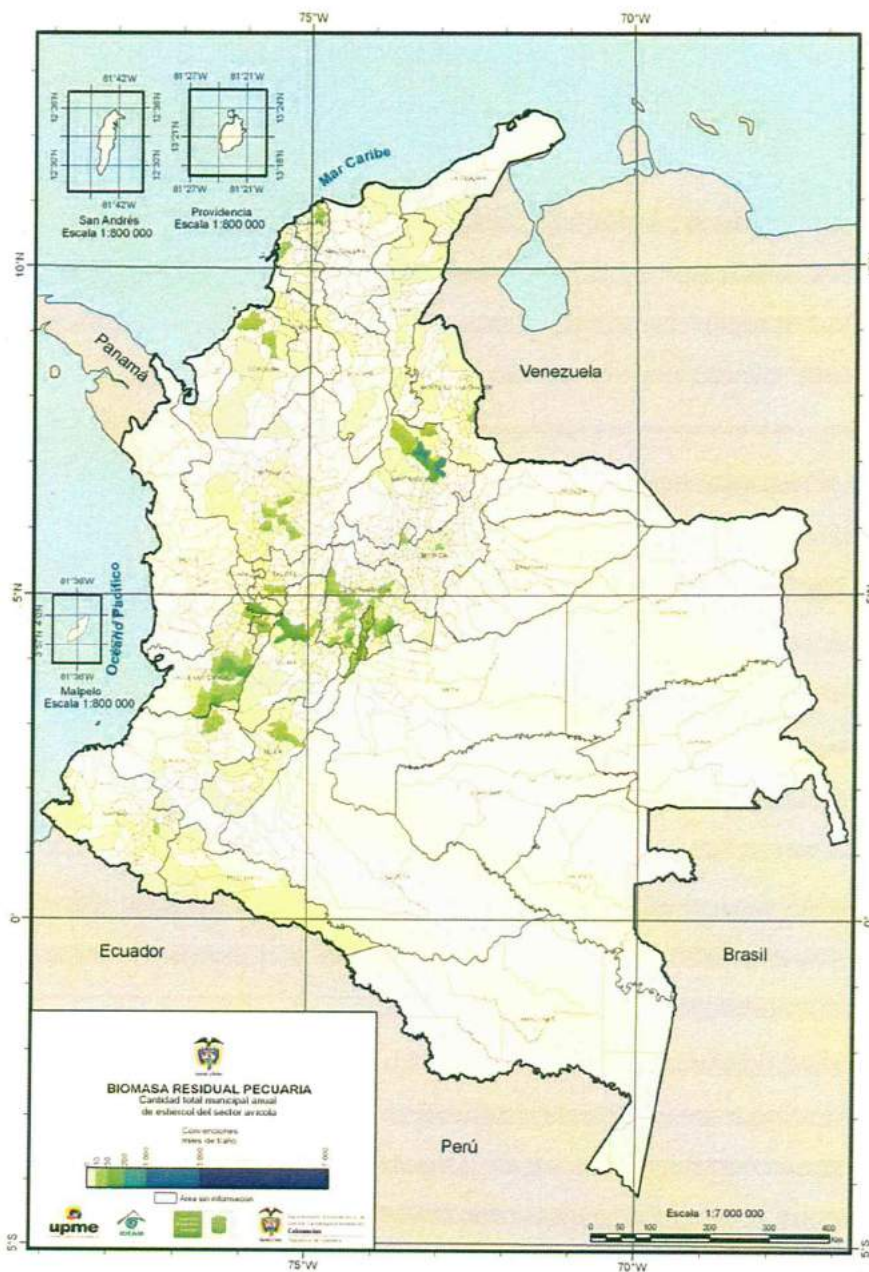
Fuente: Unidad de Planeación Minero Energética (UPME), 2010. p 104

ANEXO E – MAPA DE BIOMASA RESIDUAL PECUARIA (SOLO ESTIERCOL) – SECTOR BOVINO



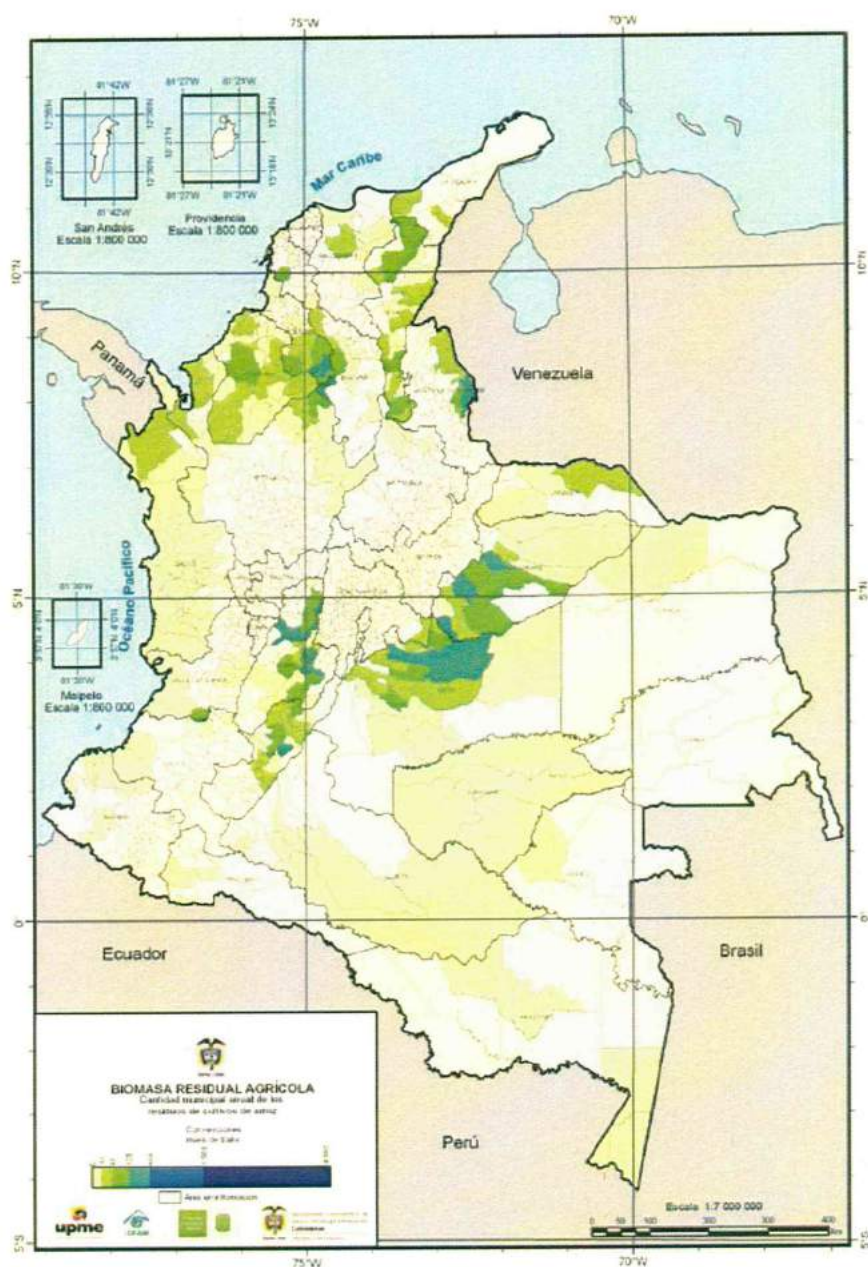
Fuente: Unidad de Planeación Minero Energética (UPME), 2010. p 100

ANEXO F – MAPA DE BIOMASA RESIDUAL PECUARIA (SOLO ESTIERCOL) – SECTOR AVICOLA



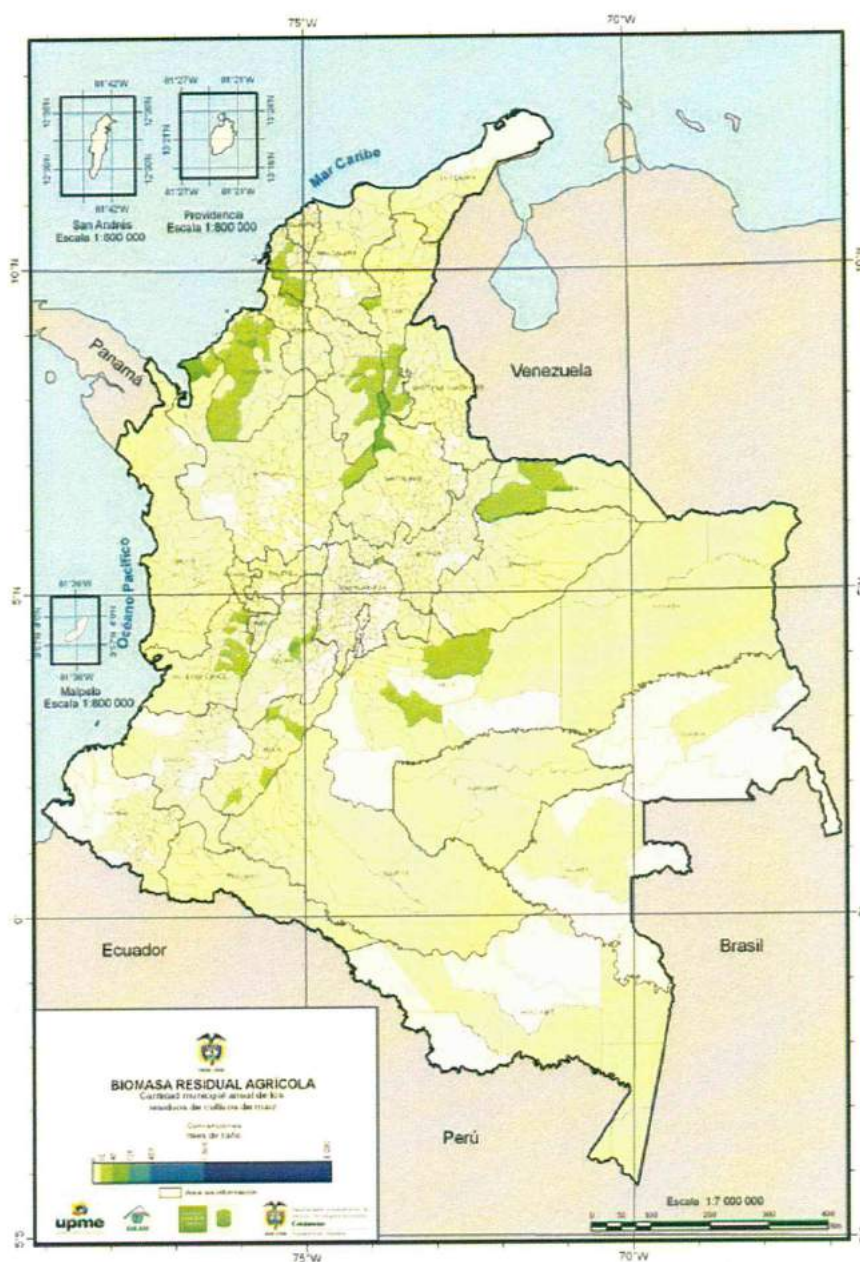
Fuente: Unidad de Planeación Minero Energética (UPME), 2010. p 96

ANEXO G – MAPA DE BIOMASA RESIDUAL AGRICOLA – RESIDUOS DE CULTIVOS DE ARROZ



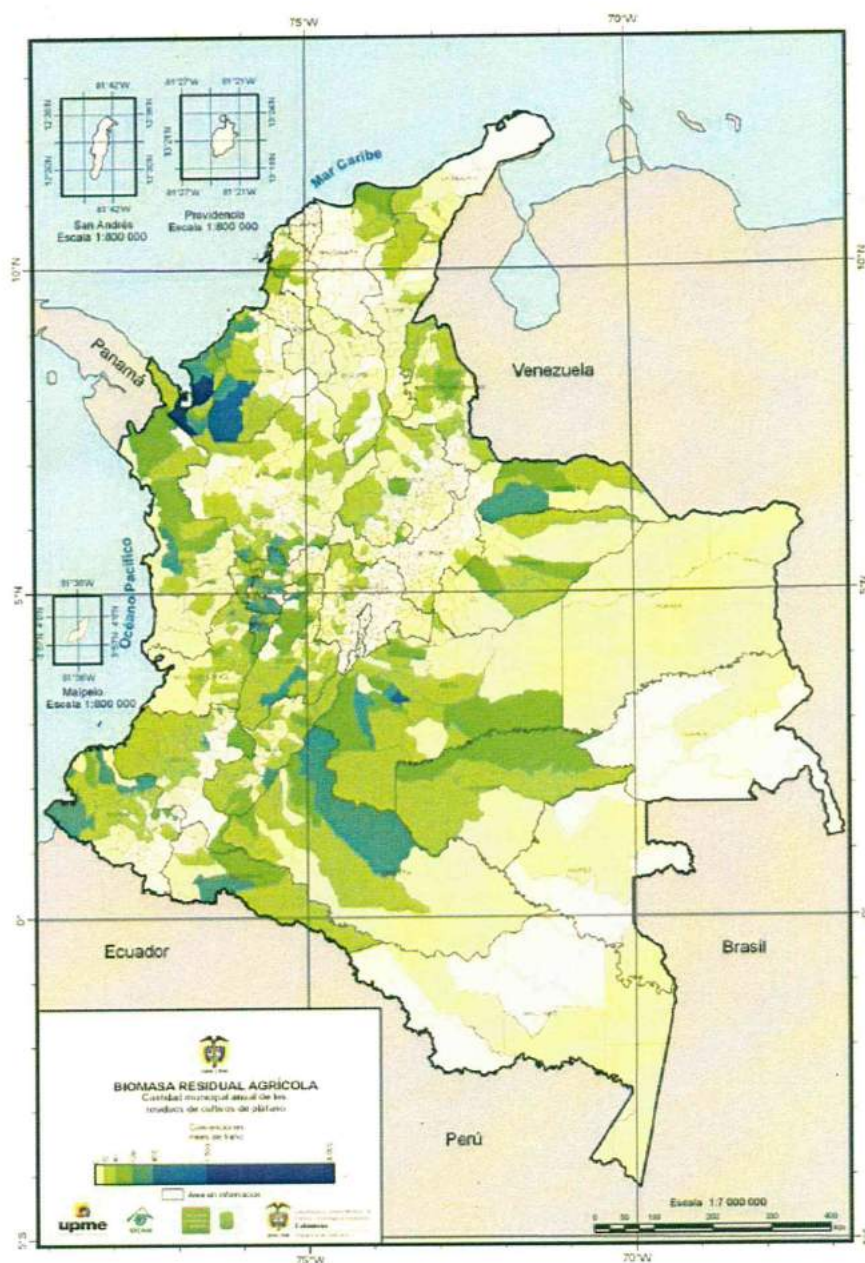
Fuente: Unidad de Planeación Minero Energética (UPME), 2010. p 52

ANEXO H – MAPA DE BIOMASA RESIDUAL AGRICOLA – RESIDUOS DE CULTIVOS DE MAIZ



Fuente: Unidad de Planeación Minero Energética (UPME), 2010. p 57

ANEXO I – MAPA DE BIOMASA RESIDUAL AGRICOLA – RESIDUOS DE CULTIVOS DE PLATANO



Fuente: Unidad de Planeación Minero Energética (UPME), 2010. p 87