

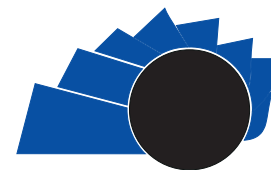


UNIVERSIDAD DISTRITAL
FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS

Visión Electrónica

Más que un estado sólido

<https://revistas.udistrital.edu.co/index.php/visele>



Visión Electrónica

VISIÓN INVESTIGADORA

La biomasa residual pecuaria como recurso energético en Colombia

The livestock residual biomass as an energy resource in Colombia

Germán López Martínez¹, Clara Buriticá Arboleda², Electo Silva Lora³

INFORMACIÓN DEL ARTÍCULO

Historia del artículo:

Enviado: 13/10/2018

Recibido: 01/11/2018

Aceptado: 21/11/2018

Palabras clave:

Biomasa residual
Contaminación atmosférica
Energía eléctrica
Estiércol animal

Open access



Keywords:

Residual biomass
Atmospheric pollution
Electric power
Animal manure

RESUMEN

La energía eléctrica en Colombia depende, fundamentalmente, de hidroeléctricas (70,0%) y termoeléctricas (29,3%), desaprovechando otras fuentes de energías renovables como la biomasa residual pecuaria, entre otras. El estiércol que se genera en la explotación pecuaria sobrepasa los 81 millones de toneladas anuales, con un potencial energético de más de 71.000 TJ/año; y no se aprovecha actualmente. Sin embargo, genera problemas de contaminación, principalmente por su inadecuada disposición final, debido a la explotación extensiva que se practica actualmente, en especial en los casos de cría de bovinos, búfalos, caballos, ovejas, cabras y una fracción de porcinos. Si se quisiera utilizar el actual potencial energético solo se podría aprovechar una fracción del mismo (14,3%); especialmente el producido por el sector avícola y una fracción de porcinos ya que estos dos sectores cuentan con un porcentaje alto de explotación en granjas tecnificadas lo que facilita la recolecta de este recurso. Se estima que se podrían generar 864 GWh/año, si se aprovecha la biomasa residual generada en granjas tecnificadas, lo que equivale a 1,3% de la actual demanda nacional de energía eléctrica.

ABSTRACT

Electricity in Colombia depends, basically, on hydroelectric (70.0%) and thermoelectric (29.3%) systems, leaving aside other sources of renewable energy such as livestock residual biomass, among others. The manure generated in the livestock operation exceeds 81 million tons per year, with an energy potential of more than 71,000 TJ / year; and it is not currently used. However, it generates pollution problems, mainly caused by its inadequate final disposal, due to the extensive exploitation that is currently practiced, especially in the cases of raising cattle, buffalo, horses, sheep, goats and a fraction of swine. If one wanted to use the current energy potential, only a fraction of it could be used (14.3%); especially the energy produced by the poultry sector and a fraction of swine, because these two sectors have a high percentage of exploitation in technical farms, which facilitate the collection of this resource. It is estimated that 864 GWh / year could be generated if the residual biomass obtained from those farms is used, equivalent to 1.3% of the current national electricity demand.

¹ Ing. Mecánico, Universidad de América, Colombia. MSc. En Ingeniería Mecánica, Universidad de los Andes, Colombia. Docente Investigador Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Colombia. Correo electrónico: germanlopezm@yahoo.es, galopezm@udistrital.edu.co. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3280-9026>

² Ing. Electricista, Universidad Nacional de Colombia, Colombia. PhD. en Gestión Eficiente de la Energía Eléctrica, Universidad Politécnica de Valencia, España. Docente Investigadora: Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Colombia. Correo electrónico: clabuar@gmail.com, cburiticaa@udistrital.edu.co ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4073-3471>

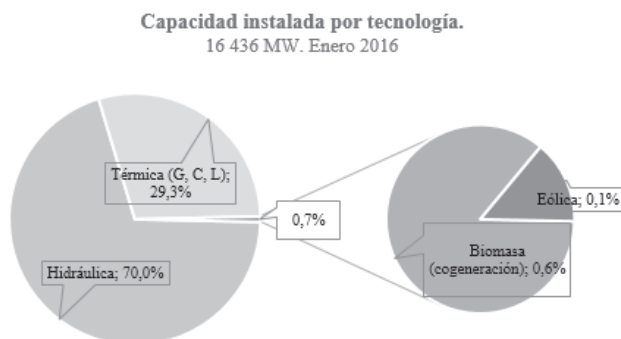
³ Ing. Mecánico, Universidad de Oriente, Cuba. MSc. y PhD. En Ingeniería Eléctrica, Universidad Politécnica de San Petesburgo, Unión Soviética. Docente Investigador: Universidad Federal de Itajubá, Brasil. Correo electrónico: silva.electo@gmail.com, electo@unifei.edu.br. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8969-3541>

1. Introducción

Colombia está ubicada en la zona norte de Suramérica, es el quinto país más grande en extensión y el tercero con mayor población en América Latina. Tiene una población superior a los 48 millones de habitantes [1]. Posee una gran diversidad geográfica lo que le permite contar con varios climas: húmedo de selva, de sabana tropical, tropical seco y estepario tropical. Es el único país de Suramérica con acceso a los océanos Atlántico y Pacífico, es uno de los países con mayor biodiversidad del mundo, con 54.871 especies distintas, [2]. Esto permite que posea una buena cantidad de recursos renovables.

De otra parte, la demanda de energía eléctrica en Colombia alcanzó en 2015, 66.548,5 GWh, la mayor de su historia hasta ese año. La capacidad instalada de generación eléctrica en Colombia, a enero de 2016 fue 16.436 MW, representada por las siguientes fuentes: hidroeléctrica (70,0%); termoeléctrica, a partir de gas natural, carbón, y combustibles líquidos (29,3%); cogeneración con biomasa de bagazo de la caña de azúcar (0,6%); y energía eólica (0,1%), tal como se muestra en la Figura 1.

Figura 1. Capacidad instalada de generación eléctrica en Colombia, por fuente, a enero de 2016, [3].



Como se observa, la dependencia hidráulica y térmica es prácticamente total, quedando por fuera de la canasta energética otras fuentes de energías, sobre todo las renovables. Algunas personas consideran que el país goza de una energía “limpia y pura” por la alta dependencia hídrica, pero esta situación hace vulnerable al país ante cualquier tipo de cambio o fenómeno climático. Por ejemplo, en 2016 el denominado “Fenómeno del Niño”, fue considerado por la *World Meteorological Organization*, el tercero más fuerte en los últimos cincuenta años, [4]; esto se evidenció a través de un déficit de lluvias, en el

período comprendido entre septiembre de 2015 y marzo de 2016; durante este tiempo, los embalses llegaron a su nivel más bajo en los últimos dieciocho años, y se requirió aumentar la generación térmica para cubrir la demanda de energía, [5].

Por otro lado, en 2014 se formuló la ley 1715 que promueve la diversificación del sistema energético nacional mediante la generación de energía eléctrica a partir de energías renovables provenientes de fuentes no convencionales [6]; sin embargo, al día de hoy se ha visto un desarrollo incipiente de esta política, sin llegar a su pleno desarrollo; hay una baja o nula inversión en estas tecnologías a pesar que Colombia posee numerosos recursos naturales como vientos, evaluados entre los 8 y 80 metros de altura en promedio; radiación solar promedio de 4,5 kWh/m²/d; y residuos agrícolas de entre 330 y 350 TJ/año. Todos estos recursos podrían ser utilizados para la generación de energía eléctrica, tal como lo recomienda el Banco Interamericano de Desarrollo [7].

La dotación de recursos de energía renovable de América Latina y el Caribe es suficiente para cubrir más de 22 veces la demanda eléctrica proyectada para el 2050, de acuerdo a un nuevo estudio encomendado por el Banco Interamericano de Desarrollo (BID)... los decrecientes costos y las nuevas tecnologías hacen de los recursos renovables una alternativa viable. Los recursos solares, geotérmicos, mareomotrices, eólicos, y la biomasa disponible en esta región podrían producir hasta 80 petavatios-hora de electricidad. ...Un petavatio-hora equivale a 1 billón de kilovatios-hora, casi 3 veces el consumo anual de México. En la actualidad, la región genera 1,3 petavatios-hora de electricidad. Para el 2050, se espera que la demanda regional crezca a entre 2,5 a 3,5 petavatios-hora. [7]

2. Metodología

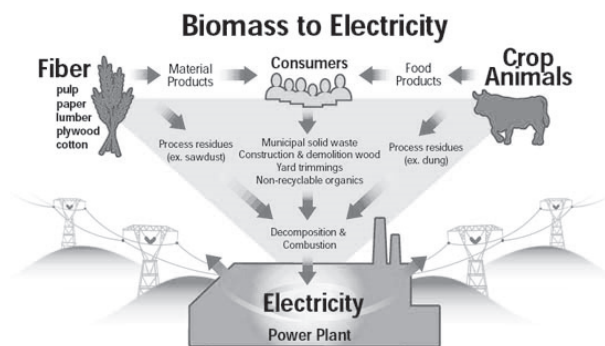
La metodología de investigación contempla tres fases: en la primera se define la biomasa residual pecuaria como recurso energético; en la segunda se estima la cantidad de biomasa residual pecuaria que se produce actualmente en Colombia; y en la tercera se calcula el correspondiente potencial energético de este recurso en el país.

2.1. La biomasa residual como recurso energético.

La biomasa es la materia viva presente en una capa muy fina de la superficie terrestre llamada

biosfera, la cual representa una mínima fracción de la masa terrestre; menos del 1%, si se acepta el símil de compararla con el espesor de la cascara de una manzana respecto a toda la fruta [8]. Los residuos que se generan a partir de los procesos de transformación natural o artificial de la materia viva también se constituyen en biomasa. En la Figura 2 se aprecia cómo a partir de la biomasa residual de origen: agrícola (fibras de pulpa, papel, madera, algodón, etc.), municipal (desechos de madera, desechos no reciclables, etc.), y pecuaria, (estiércol); es posible aprovecharla para la generación de electricidad -en una planta de potencia- usando diversos procesos tecnológicos para ser, posteriormente, distribuida por las redes de transmisión a los consumidores finales.

Figura 2. Producción de energía eléctrica a partir de residuos agrícolas, municipales y pecuarios, [9].



Como se aprecia, la biomasa residual, (ya sea de origen pecuario, agrícola, o forestal), que es considerada *subproducto*, ahora pasa a ser *recurso energético* el cual vale la pena aprovechar para la generación eléctrica, tal como se promociona en la Ley 1715 [6].

2.2. La biomasa residual pecuaria en Colombia.

La biomasa residual pecuaria se conforma por los desechos de la crianza de animales. En Colombia, según el Censo Nacional Pecuario efectuado por el Instituto Colombiano Agropecuario (ICA) en marzo de 2016, las siete (7) principales especies criadas fueron: aves, (explotación avícola), ganado vacuno, cerdos, caballos (se incluyen mulos y asnos), ovejas, cabras, y búfalos.

La población avícola (pollos y gallinas) correspondió a 157.135.371 aves, representadas en los dos tipos de explotación, (carne y huevos), las que se alojaron en 256.130 predios; la población bovina (ganado vacuno), fue de 22.555.549 cabezas, que se distribuyeron en

494.402 predios, correspondientes a explotaciones de leche, carne y doble propósito; la población porcina, en tanto, fue de 5.094.664 animales, distribuidos en 218 698 predios; la población caballar, mular y asnal fue de 1.451.085, y estuvo representada por animales de exposición, deporte y trabajo, equino de paso fino, trote, trocha o galope, ejemplares de coleo, carreras o tiro y mular y asnal de labor; la explotación de la especie ovina en el país registró la existencia de 1.423.274 animales; mientras que la especie caprina registró 1.124. 508 cabezas; y, finalmente, la población bufalina de 248.893 animales, distribuidos en 3.484 predios, [10]. En la Tabla 1 se muestra el resumen de este censo pecuario.

Tabla 1. Censo pecuario en Colombia. Marzo de 2016

Explotación pecuaria	Cabezas	%
Avícola	157 135 371	83,1%
Bovina	22 555 549	11,9%
Porcina	5 094 664	2,7%
Equina (caballos, mulas y asnos)	1 451 085	0,8%
Ovina	1 423 274	0,8%
Caprina	1 124 508	0,6%
Bufalina	248 893	0,1%
Total	189 033 344	100,0%

Fuente: elaboración propia a partir de [9-10].

La explotación avícola abarca el 83,1% de los animales pecuarios en Colombia, seguido por la explotación bovina con 11,9%. Por otro lado, las explotaciones bovina, caballar, ovina, caprina y bufalina se caracterizan por ser, principalmente, extensivas o a campo abierto; mientras que las avícola y porcina tienen importantes porcentajes de confinamiento debido a su explotación en granjas tecnificadas, [11].

2.3. Potencial energético de la biomasa residual pecuaria en Colombia.

El potencial energético de la biomasa residual puede clasificarse en varias categorías, dos de ellas, según [12], son:

- *Potencial teórico:* es la bioenergía que se puede obtener a partir de la biomasa residual, considerada teóricamente disponible dentro de los límites biofísicos determinados.
- *Potencial técnico:* es la fracción del potencial teórico disponible considerando las condiciones y limitaciones actuales.

En estas valoraciones es necesario identificar, entre otros aspectos, las tecnologías más convenientes de conversión de la biomasa en bioenergía; entre ellas se tienen la transformación bioquímica de manera anaerobia, (producción de biogás), apropiada para biomasa residual con altos contenidos de humedad (mayor a 75%), o la termoquímica, como la combustión directa, o la gasificación, tecnologías apropiadas para biomasa con valores bajos de humedad, (menores a 50%), [13]. Ver Figura 3.

Para el presente trabajo, se considera la conversión bioquímica (digestión anaerobia) como la más apropiada debido a que la biomasa residual pecuaria fresca contiene valores de humedad superiores al 75%, [14-16].

Por lo anterior, es necesario establecer la cantidad de estiércol producido por las diferentes especies pecuarias, así como la cantidad de biogás generado. La valoración energética requiere de los datos que se muestran en la Tabla 2.

En la Tabla 2 se muestran los valores de producción diaria de estiércol, los porcentajes de materia seca, total, (MS) y orgánica, (MOS), la relación carbono-nitrógeno, (C/N), y el volumen de biogás generado a partir de la masa de estiércol disponible. En el caso de la relación C/N, esta debe ser ajustada a valores entre 20 y 30 para favorecer la digestión. Con estos datos y con la cantidad de cabezas de animales (Tabla 1), es posible establecer las cantidades totales de producción de biomasa

Figura 3. Rutas tecnológicas de transformación de la biomasa en bioenergía según su contenido de humedad, [13].

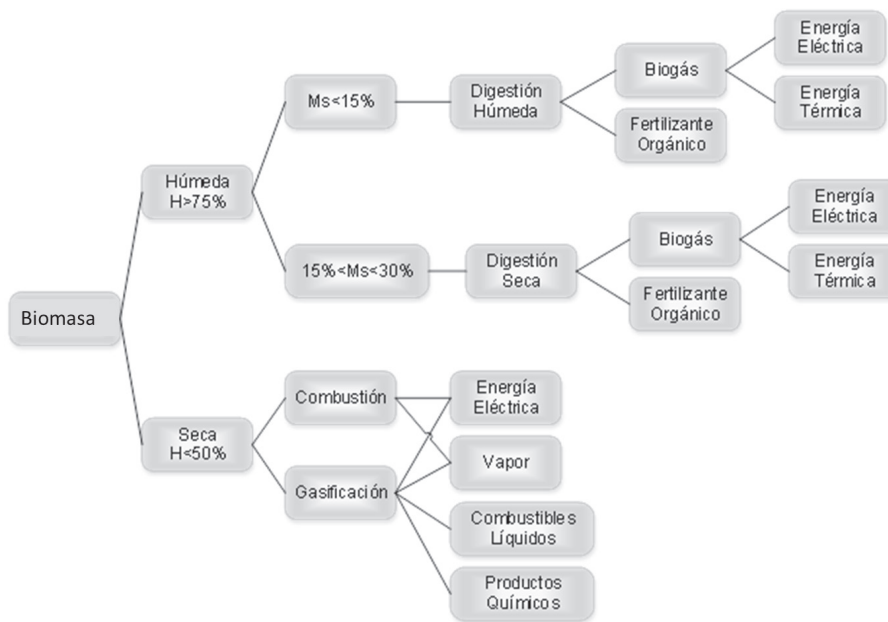


Tabla 2. Producción de estiércol y biogás según especie pecuaria, incluidos masa seca y relación carbono-nitrógeno, [17-23].

Especie	Prod. Estiércol	Materia seca. Total, y orgánica.		Relación	Prod. Biogás
	kg/d	% MS	%MOS	C/N	m ³ /kg estiércol.
Pecuaria	0,06 a 0,08	25	16	5	0,06
Avícola	7 a 10	16	13	25	0,04
Bovina	2 a 4	17	14	13	0,07
Equina	8 a 12	25	15	25	0,04
Ovina	0,5 a 1,5	30	20	30	0,05
Caprina	0,5 a 1,5	30	20	30	0,05
Bufalina	10 a 13	14	12	20	0,04

residual pecuaria y de biogás con las cuales se determinan los potenciales energéticos.

Por otro lado, en el biogás generado, el metano (CH_4) es el gas combustible, por lo que su poder calorífico es usado para la valoración energética, y éste depende del contenido de metano en el biogás, tal como se muestra en la Tabla 3.

Tabla 3. Poder calorífico del biogás según el contenido de metano, [24-25].

Biogás		
% CH_4	kcal/m ³	kJ/m ³
50%	4 306	18 016
60%	5 167	21 620
70%	6 029	25 224

Otro aspecto que hay que considerar, es la fracción de animales confinados en galpones o granjas tecnificadas, que son los lugares donde es más factible la recolecta de la biomasa residual, sin que se contamine con sustancias extrañas. Este valor ha sido estimado, para cada tipo de explotación animal, por el grupo de investigación en energías alternativas de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas (GIEA-UD), en la ciudad de Bogotá, [26]. Ver Tabla 4.

En consecuencia, el potencial teórico corresponde a la valoración energética anual de la totalidad de biomasa residual pecuaria generada en el país, mientras que el potencial técnico es la valoración de la biomasa residual pecuaria que es factible de recolectar bajo las limitaciones (físicas, económicas y ambientales) actuales; en este último caso, corresponde a la biomasa residual pecuaria generada en granjas tecnificadas. En ambos casos,

esta valoración se expresa en TJ/año, tal como se muestra en la Tabla 5.

Estos cálculos se realizaron asumiendo un contenido de metano de 60% en el biogás. Al analizar los datos de la Tabla 5, se aprecia que los potenciales energéticos teórico y técnico de la biomasa residual pecuaria en Colombia son 75 068 TJ/año y 10 724 TJ/año respectivamente. El potencial técnico corresponde al 14,3% del teórico; este valor se puede interpretar como el grado de tecnificación (o confinamiento) global de la explotación pecuaria nacional.

En las Figuras 4 y 5 se muestran, respectivamente, los potenciales teórico y técnico de la biomasa residual pecuaria por el tipo de explotación animal, donde se indica el porcentaje que representa cada una de ellas.

Tabla 4. Número de cabezas de animales pecuarios y grado de confinamiento en Colombia, [26].

Tipo explotación	No Cabezas	% confinamiento
Avícola	157.135.371	96,2
Bovina	22.555.549	1,4
Porcina	5.094.664	65,7
Equina	1.451.085	10,0
Ovina	1.423.274	4,0
Caprina	1.124.508	2,0
Bufalina	248.893	1,4

En la Figura 4 se aprecia que el 75,9% del potencial teórico corresponde a la biomasa residual bovina, seguido por las biomásas provenientes de la explotación avícola, porcina y equina, con 7,9%, 7,5% y 6,1 %, respectivamente.

Tabla 5. Potenciales energéticos teórico y técnico de la biomasa residual pecuaria por especie animal.

Tipo Explotación	No Cabezas	Estiércol t/año	Biogás m ³ /año	Potencial Teórico TJ/año	Conf. %	Potencial Técnico TJ/año
Avícola	157.135.371	4.588.353	275.301.170	5.952	96,2	5.726
Bovina	22.555.547	65.862.197	2.634.487.890	56.958	1,4	797
Porcina	5.094.664	3.719.105	260.337.330	5.629	65,7	3.698
Equina	1.451.085	5.296.460	211.858.410	4.580	10,0	458
Ovina	1.423.274	5.194.95	25.974.751	562	4,0	22
Caprina	1.124.508	410.445	20.522.271	444	2,0	9
Bufalina	248.893	1.090.151	43.606.054	943	1,4	13
Total	189.033.342	81.486.206	3.472.087.876	75.068	14,3	10.724

Fuente: elaboración propia.

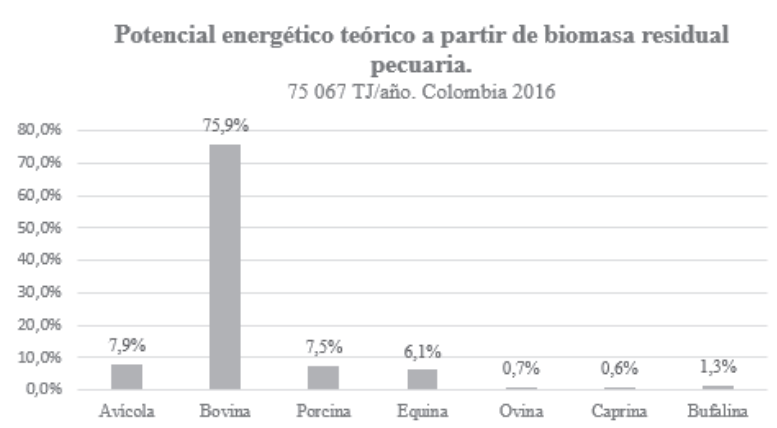
En la Figura 5 se aprecia que las biomasa residuales de las dos especies de animales con mayor potencial energético técnico son: la avícola y la porcina, con 53,4% y 34,5% respectivamente. Vale la pena resaltar que el potencial técnico de biomasa residual del sector bovino representa escasamente el 7,4% del total. Este último dato, (sector bovino), demuestra que el porcentaje de posible aprovechamiento de esta biomasa residual con fines energéticos es muy bajo, (escasamente llega a 1,4%), indicativo de un desperdicio muy alto de este recurso, principalmente por ser un sector desarrollado con tecnología extensiva, además de convertirse en vector contaminante del medio ambiente, por la alta dispersión de este recurso a campo abierto, [27-28].

3. Análisis de resultados.

De acuerdo con los potenciales energéticos estimados en el apartado anterior, se puede calcular la energía eléctrica que se podría generar, en *Wh*, a partir de cada *J* de energía contenida en el biogás obtenido a partir de la digestión anaerobia de la biomasa residual, para lo cual basta con multiplicar, los potenciales energéticos, por 1 hora y dividirlos por 3600 segundos.

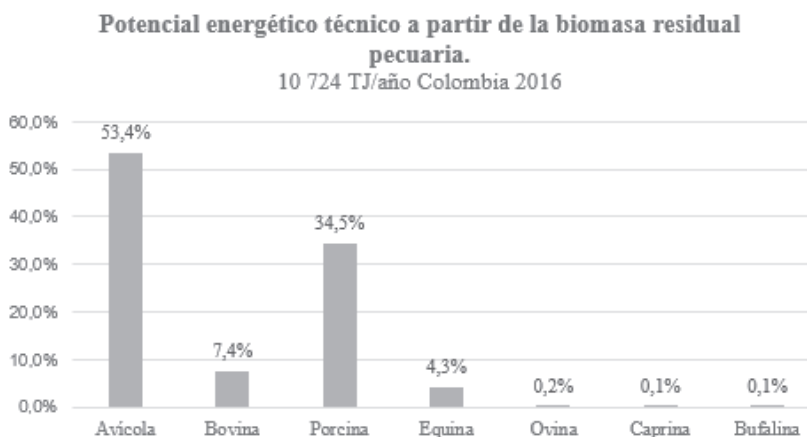
En cuanto a la conversión de energía, es necesario contar con una tecnología apropiada, ya sea: turbina de vapor, de gas, o motor de combustión interna, en cualquier caso, se debe considerar la eficiencia térmica de conversión energética; en este

Figura 4. Distribución porcentual del potencial teórico por tipo de explotación animal en Colombia, en 2016.



Fuente: elaboración propia.

Figura 5. Distribución porcentual de potencial técnico por especie animal en Colombia, en 2016.



Fuente: elaboración propia.

caso específico se consideró un valor de 30%, si se usa cualquiera de estas tecnologías, que es un valor típico, [29-31]. En este caso, se podrían generar 6.260 GWh/año si se usara el potencial energético teórico, correspondiente a toda la biomasa residual pecuaria; y 894 GWh/año si se usara el potencial técnico correspondiente a la biomasa residual factible de recolectar en las granjas tecnificadas, estos valores equivalen respectivamente a 9,4% y 1,3% de la energía producida en Colombia en 2015; energía que hubiera ayudado a sopesar los efectos sufridos durante el pasado fenómeno del Niño en el país.

El recurso biomasa residual pecuaria en Colombia es relativamente abundante; se generan algo más de 81.486.000 t/año, lo que da un potencial energético teórico de más de 75.000 TJ/año con el cual se podrían generar hasta 6.260 GWh/año, equivalente al 9,4% de la energía total producida en Colombia en 2015; sin embargo, esta cantidad de energía no está siendo aprovechada y, más aún, no sería posible su recolecta total porque la gran mayoría de ella proviene del ganado bovino y se encuentra dispersa en campos abiertos debido al tipo de explotación (extensiva), situación que además genera problemas de contaminación ambiental. Se deberá pensar en impulsar políticas que promuevan el cambio de la forma de explotación ganadera en Colombia para pasar de una modalidad extensiva a una intensiva o semi intensiva, donde se logre una explotación sostenible y se disminuya la alta dispersión de la biomasa residual para facilitar su recolecta y aprovecharla energéticamente, además de disminuir las emisiones de gases de efecto invernadero, como lo es el metano generado. Adicionalmente, el efluente resultante del proceso de la biodigestión puede ser usado como abono y fertilizante de tierras agrícolas, lo que le da un valor agregado a esta política, [32-34].

En otro sentido, por las condiciones de explotación pecuaria que se tiene actualmente en Colombia, solo es posible aprovechar el 14,3% (11 636 230 t/año) del total de biomasa residual pecuaria generada anualmente, que corresponde a la biomasa residual pecuaria generada de las granjas tecnificadas, equivalente a un potencial técnico de 10 724 TJ/año con el que se lograría una producción eléctrica de 894 GWh/año, equivalente al 1,3% de la energía total producida en Colombia en el año 2015.

En el caso concreto de las zonas no interconectadas, si se considera que una vivienda rural de un país en vía de desarrollo demanda en promedio 35 kWh /mes/hogar de energía (1,17 kWh/

día) [35], ésta se puede proveer a partir del biogás; asumiendo una eficiencia de conversión en energía eléctrica entre 20% y 30%, (equipos pequeños), según la tecnología seleccionada, se requerirán entre 3,9 y 5,8 kWh /día proveniente del biogás, que equivalen a 14.040 y 20.900 kJ/día; o a 1,0 y 1,4 m³/día de biogás, respectivamente. Estas cantidades de biogás se pueden producir con la biomasa residual proveniente de alguna de las siguientes especies de animales indicadas en la Tabla 6.

Tabla 6. Cantidad de animales necesarios para generar biogás suficiente para satisfacer las necesidades energéticas en una vivienda rural, en un país en vías de desarrollo.

Animales	Biogás/día	
	1,0 m ³	1,4 m ³
Pollos+gallinas	208	292
Vacas	3	4
Cerdos	7	10

Fuente: elaboración propia.

4. Conclusiones.

La canasta energética colombiana se sustenta principalmente en energía hidroeléctrica (70,0%) y termoeléctrica de origen fósil (29,3%), dejando menos del 1% a otras fuentes de energía renovables, como la eólica y la cogeneración con bagazo de caña; esta realidad deja al país en situación de riesgo de racionamientos frente a fenómenos atmosféricos, como el “Fenómeno del Niño”.

La generación de más de 81.486.000 t/año de estiércol pecuario, con un poder energético teórico superior a 75.000 TJ/año, con el que se podría generar hasta 6.260 GWh/año; energía con la cual se podría cubrir parte del déficit de energía hidroeléctrica en futuros fenómenos climáticos; lamentablemente, este recurso no se está aprovechado y, más bien, en un alto porcentaje se ha convertido en un vector emisor de gas metano, uno de los gases de efecto invernadero, además de otros tipos de contaminantes al ambiente.

Por lo anterior, el gobierno nacional debe promover políticas que permitan la migración de la explotación ganadera bovina, de forma extensiva por una intensiva o semi intensiva para permitir la recolecta la biomasa residual generada, recurso energético con el que se podría cubrir parte de la demanda energética en Colombia; adicionalmente,

se estaría contribuyendo a la disminución de emisión de gases de efecto invernadero.

Como consecuencia, del total de este recurso energético, en la actualidad, solo se podría utilizar un 14,3%, (11.640 t/año), lo que equivale a 10.724 TJ/año, o sea 894 GWh/año en energía eléctrica, la que puede contribuir a aumentar la actual oferta energética en el país hasta un 1,3% adicional, situación que en la actualidad tampoco se está realizando a pesar de contar con leyes que impulsen su uso, como la ley 1715 de 2014 -bien vale la pena identificar las barreras que no permiten una completa implementación de esta, para superarlas-.

Finalmente, las zonas no interconectadas de Colombia atesoran en la biomasa residual pecuaria un recurso energético que, en unión con otras fuentes, podría ayudar al desarrollo económico y social que tanta falta hace en estas regiones; eso sí, si se explota de una manera sustentable y responsable con el ambiente.

5. Reconocimientos.

Los autores expresan su reconocimiento a los grupos de investigación GIEA.UD y ARMOS, de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas; al grupo de investigación GNEST, de la Universidad Federal de Itajubá Brasil; y al Doctorado en Ingeniería de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas por sus valiosos aportes y apoyo permanente.

Referencias

- [1] DANE, “Departamento Administrativo nacional de Estadística DANE” Febrero de 2016. [En línea]. Disponible en: <https://www.dane.gov.co/index.php/sistema-estadistico-nacional-sen#sistemas-de-consulta-sen>
- [2] SIB, “Biodiversidad en Colombia” Marzo de 2016 [En línea]. Disponible en: <http://www.sibcolombia.net/web/sib/cifras>; <http://www.sibcolombia.net/web/sib/cifras>
- [3] UPME, “Informe mensual de variables de generación y del mercado eléctrico colombiano” junio de 2017 [En línea]. Disponible en: <http://www.siel.gov.co/>
- [4] World Meteorological Organization, “International cloud atlas” marzo de 2017 [En línea]. Disponible en: <https://cloudatlas.wmo.int/preface-to-the-2017-edition.html>
- [5] XM, “Informes 2016” Informes 2016, abril de 2017 [En línea]. Disponible en: <http://informesanuales.xm.com.co/2016/SitePages/Default.aspx>
- [6] Congreso Republica de Colombia, “Ley 1715 de 2014” diciembre de 2016 [En línea]. Disponible en: http://www.upme.gov.co/Normatividad/Nacional/2014/LEY_1715_2014.pdf
- [7] BID, “BID: America Latina y el caribe podrán cubrir sus necesidades eléctricas con recursos renovables” mayo de 2017 [En línea]. Disponible en: <http://www.iadb.org/es/noticias/articulos/2013-06-18/energia-renovable-de-america-latina-y-el-caribe,10486.html>
- [8] V. Vernadsky, “La biosfera” Colección Economía y Naturaleza. Fundación Argentaria. Pp 78 – 82 y 114-118, España, 1997. Disponible en: <http://www.fcmanrique.org/recursos/publicacion/4a265c0bLabiosfera1-2.pdf>
- [9] World Resources SIM Center, “Biomass to electricity” julio de 2017 [En línea]. Disponible en: http://www.wrsc.org/attach_image/biomass-electricity
- [10] ICA, “Censo Nacional Pecuario en Colombia” noviembre de 2016 [En línea]. Disponible en: <http://www.ica.gov.co/getdoc/8232c0e5-be97-42bd-b07b-9cdbfb07fcac/Censos-2008.aspx>
- [11] B. B. & E. Smeets, “Harmonising bioenergy resource potentials. Methodological lesson from review of state of art bioenergy potential assessments”, The Netherlands: The Netherlands, Vol 16, No 9, pp 6598-6630, <https://doi.org/10.1016/j.rser.2012.09.002>, 2012.
- [12] F. Nava; X, Dolán, “Cultivos energéticos”, Madrid: Internacional de Agricultura de Precisión, vol.11 no.1 Texcoco ene./mar. 2014
- [13] O. Quintana, “Porquinaza en la alimentación animal” Revista Lasallista, n° 1, Vol 1, pp. 72-76, 2014. [En línea]. Disponible en: <http://repository.lasallista.edu.co/dspace/bitstream/10567/192/1/072-76%20Porquinaza%20en%20la%20alimentaci%C3%B3n%20animal.pdf>

- [14] Naskeo, “Biogas.Renewable Energy” Envirennement, Qubec. Canada, 2009. es.slideshare.net/CesarRenteria2/combustibles-y-poder-calorifico
- [15] Min-Agricultura, “Anuario estadístico del sector agropecuario” MADR, Bogotá., 2013. [En línea]. Disponible en: <http://www.agronet.gov.co/Noticias/Paginas/Noticia842.aspx>
- [16] DEFRA, “Anaerobic digestion in Agricultura: Policies and markets for growth” Workshop report, Paris., 2007.
- [17] UPME, “Sistema de información de eficiencia energética y energías alternativas” [En línea]. Disponible en: <http://www.si3ea.gov.co/>
- [18] L, Ortiz; A, Vasquez, G Piñeiro. “Aprovechamiento de la biomasa forestal producida por la cadena Monte-Industria” Revista CIS – Madera. Pp 17 – 32. Vol 13. No 2. Madrid. 2015 [En línea]. Disponible en: https://unionsagrarias.org/archivos/docs/Aprovechameinto_Biomasa_I.pdf
- [19] FENERCOM, “Guia de valorización energética de los residuos” 2010. [En línea]. Disponible en: <https://www.fenercom.com/pdf/publicaciones/Guia-de-valorizacion-energetica-de-residuos-fenercom-2010.pdf>
- [20] D, Muñoz; A, Pantoja; M, Cuatin. “Aprovechamiento de residuos agroindustriales como biocombustible y biorefinería”. Revista Biotecnología en el sector Agropecuario y Agroindustrial. Vol 12 No 2 pp 10-19. 2014 [En línea]. Disponible en: <http://www.scielo.org.co/pdf/bsaa/v12n2/v12n2a02.pdf>
- [21] F. Martínez, Evaluación de la biomasa como recurso energético, Tesis Maestría Barcelona: Universitat de Girona., 2009.
- [22] IIP, “Uso de excretas en sistemas integrados de producción animal” Instituto de Investigaciones porcinas. Punta Brava, La Habana Cuba, 2007. [En línea]. Disponible en: http://avpa.ula.ve/eventos/viii_encuentro_monogastricos/curso_alimentacion_no_convencional/conferencia-7.pdf
- [23] UPME, “Atlas de Biomasa residual en Colombia” Unidad de Planeación Minero Energética, Bogotá, 2010.
- [24] Antonieta, “Combustión, combustibles y poder calórico” [En línea]. Disponible en: <https://>
- [25] G. López, “Procesos de transformación de biomasa en biogás” Notas, Bogotá, 2015.
- [26] S. Calvet, “Contaminación atmosférica. Mitigación y adaptación a través de la nutrición animal” Revista Nutri- News, pp. 6–14, 2015 [En línea]. Disponible en: <https://nutricionanimal.info/contaminacion-atmosferica-mitigacion-y-adaptacion-a-traves-de-la-nutricion-animal/>
- [27] V, Sanjo; V Se Jain; M Bagath; A Rantnakaran; A, Lees; “Modeling of Greenhouse Gas Emission from Livestock” 2016 [En línea]. Disponible en: <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fenvs.2016.00027/full>
- [28] G. Palacios, “Análisis de eficiencia de un motor de combustión interna de una planta eléctrica de 1MW” Ciudad de Guatemala: Universidad de San Carlos. Guatemala, 2007.
- [29] I. Martínez, “Eficiencias térmicas de ciclos de potencia” de Termodinámica básica aplicada, Madrid., EME, 2013, pp. 438–467.
- [30] R. Cosme, “Análisis termodinámico de ciclos de potencia” de Termodinámica aplicada, Valencia, España, UPV, 2015.
- [31] Pork CRC, “Bioenergy Support Program”. Australia, Santa Lucia: Pork CRC, 2012.
- [32] L. &. Tricase, “State of art and prospectsof Italian biogas productionfrom animal sewage” *Elsevier*, pp. 45-54, 2009.
- [33] M. Poesch, “Environmental impacts of biogas deployment: life cycle assesment of multiple production” *Elsevier*, pp. 36-43, 2012.
- [34] C. Rodríguez y A. Sarmiento, «Dimensionado mediante simulación de sistemas de energía solar fotovoltaica aplicados a la electrificación rural,» *Ingeniería Mecánica*, vol. 14, pp. 21–28, 4 2011.
- [35] Banco Mundial, “Perú encuesta nacional de consumo de energía a hogares rurales”.p 75, Washington USA, 2010. Disponible en: <http://documentos.bancomundial.org/curated/es/226171468294327057/pdf/575640P10996901umo0Hogares01PUBLIC1.pdf>