

**EVALUACIÓN DE LA DISPONIBILIDAD DE BIOMASA RESIDUAL AGRÍCOLA
Y SU POTENCIAL ENERGÉTICO EN ZNI DE COLOMBIA: CASO DE ESTUDIO**

LEIDY KATHERINE RODRÍGUEZ CÁCERES

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICOQUÍMICAS
MAESTRÍA EN INGENIERÍA QUÍMICA
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA
BUCARAMANGA
2016**

**EVALUACIÓN DE LA DISPONIBILIDAD DE BIOMASA RESIDUAL AGRÍCOLA
Y SU POTENCIAL ENERGÉTICO EN ZNI DE COLOMBIA: CASO DE ESTUDIO**

LEIDY KATHERINE RODRÍGUEZ CÁCERES

**Trabajo de investigación para optar por el título de
MAGÍSTER EN INGENIERÍA QUÍMICA**

**DIRECTOR:
VIATCHESLAV KAFAROV
Ingeniero Químico, Ph.D.**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICOQUÍMICAS
MAESTRÍA EN INGENIERÍA QUÍMICA
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA
BUCARAMANGA
2016**

DEDICATORIA

A Dios por ser mi luz, mi ancla, mi fortaleza y amor, en medio de este proceso.

A mis padres por su constante apoyo y amor incondicional en cada etapa de mi vida.

A mi esposo por ser mi ayuda y complemento, siempre.

¡Gracias!,

Kathe

AGRADECIMIENTOS

Al Doctor Viatcheslav Kafarov, Director del trabajo de investigación y decano de la Facultad de Ingenierías Fisicoquímicas de la Universidad Industrial de Santander, por su apoyo técnico e intelectual.

Al Centro de Investigación para el Desarrollo Sostenible en Industria y Energía – CIDES, dirigido por el Dr. Viatcheslav Kafarov, por todo el apoyo técnico brindado.

A Colciencias por el apoyo financiero brindado para el desarrollo del presente proyecto.

TABLA DE CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN	15
2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	17
3. MARCO TEÓRICO Y ESTADO DEL ARTE	19
3.1 ZONAS NO INTERCONECTADAS DE COLOMBIA	19
3.2 LA BIOMASA COMO RECURSO ENERGÉTICO	20
3.2.1 Evaluación del potencial energético	22
3.2.2 Caracterización de biomasa residual agrícola	25
3.2.3 Tecnologías de conversión	28
3.2.4 Análisis de componentes principales	30
4. HIPÓTESIS	33
5. OBJETIVOS	34
5.1 OBJETIVO GENERAL	34
5.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	34
6. METODOLOGÍA	35
6.1 CÁLCULO DE LA DEMANDA ENERGÉTICA Y SELECCIÓN DE LAS ZONAS DE ESTUDIO	36
6.2 IDENTIFICACIÓN DE LA BIOMASA RESIDUAL AGRÍCOLA (BRA)	37
6.3 MUESTREO DE LA BIOMASA RESIDUAL AGRÍCOLA	38
6.4 CARACTERIZACIÓN FISICOQUÍMICA DE LA BRA	38
6.5 ESTIMACIÓN DEL POTENCIAL ENERGÉTICO	40
6.5.1 Representación cartográfica del potencial energético	42

6.6 ANÁLISIS MULTIVARIANTE ENFOCADO A LA IDENTIFICACIÓN DE LAS TECNOLOGÍAS DE APROVECHAMIENTO ENERGÉTICO PARA LA BRA	42
7. RESULTADOS Y ANÁLISIS	44
7.1 DEMANDA ENERGÉTICA Y ZONAS DE ESTUDIO	44
7.2 BIOMASA RESIDUAL AGRÍCOLA SELECCIONADA	46
7.3 MUESTREO DE LOS RESIDUOS AGRÍCOLAS DE COSECHA (RAC)	49
7.4 CARACTERIZACIÓN FISICOQUÍMICA DE LOS RAC	50
7.4.1 Análisis básico	50
7.4.2 Análisis elemental	52
7.4.3 Análisis próximo	54
7.4.4 Análisis estructural	55
7.4.5 Contenido energético	56
7.5 POTENCIAL ENERGÉTICO DE LOS RAC	57
7.5.1 Relación residuo a producto (RRP)	58
7.5.2 Masa y potencial energético de los RAC	60
7.5.3 Representación cartográfica del potencial energético	63
7.6 ANÁLISIS MULTIVARIANTE ENFOCADO A LA IDENTIFICACIÓN DE LAS TECNOLOGÍAS DE APROVECHAMIENTO ENERGÉTICO PARA LOS RAC	66
CONCLUSIONES	74
BIBLIOGRAFÍA	75

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Caracterización fisicoquímica de la biomasa residual agrícola.....	39
Tabla 2. Demanda energética de los departamentos ZNI de Colombia.	44
Tabla 3. Cultivos y residuos seleccionados por departamento.....	48
Tabla 4. Localización de los sitios de muestreo en las zonas de estudio.....	49
Tabla 5. Resultados de los análisis fisicoquímicos de la biomasa residual agrícola.	51
Tabla 6. RRP de los RAC del presente trabajo y de otros estudios.	58
Tabla 7. Masa y PE de los RAC de los cultivos en cada departamento.	60
Tabla 8. Energía eléctrica (EE) que podrían generar los RAC en cada departamento.....	63
Tabla 9. Matriz de correlación para los datos de la tabla 5.....	66
Tabla 10. Eigenvalores y varianza de los componentes.....	69
Tabla 11. Tabla de pesos de las componentes principales o matriz P truncada en las tres primeras componentes.....	70
Tabla 12. Tabla de nuevas coordenadas para cada uno de los RAC o matriz Y...	70

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Clasificación de la biomasa según su origen	21
Figura 2. Principales rutas de conversión de biomasa	29
Figura 3. Diagrama de flujo de la metodología desarrollada en el trabajo.	35
Figura 4. Mapa de Colombia con los departamentos caso de estudio.	45
Figura 5. Área (ha) de los principales cultivos en las ZNI de Caquetá.	46
Figura 6. Área (ha) de los principales cultivos en las ZNI de Chocó.	46
Figura 7. Área (ha) de los principales cultivos en las ZNI de Meta.	47
Figura 8. Área (ha) de los principales cultivos en las ZNI de Putumayo.	47
Figura 9. Porcentaje de humedad en los RAC.	50
Figura 10. Poder Calorífico Inferior de los RAC.	57
Figura 11. Masa de residuos agrícolas de cosecha generada en cada departamento.	61
Figura 12. Potencial energético de los RAC en cada departamento.	62
Figura 13. Mapa del potencial energético en las ZNI de Caquetá.	64
Figura 14. Mapa del potencial energético en las ZNI de Chocó.	64
Figura 15. Mapa del potencial energético en las ZNI de Meta.	65
Figura 16. Mapa del potencial energético en las ZNI de Putumayo.	65
Figura 17. Matriz de dispersión para el análisis de correlación de Pearson.	67
Figura 18. Gráfico de sedimentación para eigenvalores.	69

Figura 19. Dispersión de las muestras mediante el análisis de componentes principales PCA.71

LISTA DE ANEXOS

	Pág.
Anexo A. Registro fotográfico del muestreo realizado en Caquetá, Chocó, Meta y Putumayo.....	83
Anexo B. Procedimiento analítico de laboratorio para la determinación del análisis estructural.....	89
Anexo C. Ejemplo de la plantilla descriptiva usada en el sitio de muestreo.....	91
Anexo D. Municipios pertenecientes a las ZNI de los departamentos de estudio y su potencial energético.....	92

RESUMEN

TÍTULO: EVALUACIÓN DE LA DISPONIBILIDAD DE BIOMASA RESIDUAL AGRÍCOLA Y SU POTENCIAL ENERGÉTICO EN ZNI DE COLOMBIA: CASO DE ESTUDIO*

AUTOR: LEIDY KATHERINE RODRÍGUEZ CÁCERES**

PALABRAS CLAVE: zonas aisladas, biomasa residual agrícola, potencial energético, propiedades fisicoquímicas, conversión energética.

En las Zonas No Interconectadas (ZNI) de Colombia se generan gran cantidad de residuos agrícolas y forestales que, en su mayoría, no están teniendo ningún uso y aprovechamiento y que podrían ser aprovechados en la generación de energía eléctrica. Sin embargo, para desarrollar proyectos futuros de energización rural a partir de biomasa residual, es necesario disponer de información actualizada sobre las propiedades fisicoquímicas y el potencial energético de la misma, disponible en dichas zonas. Por lo anterior, se evaluó el potencial energético de los residuos de cultivos agrícolas representativos en cuatro departamentos de las ZNI de Colombia (Caquetá, Chocó, Meta y Putumayo), los cuales presentaron altos valores de demanda energética. Este potencial fue calculado mediante el uso de un modelo matemático que involucra la masa de residuo y su contenido energético, el cual tuvo como factor importante el cálculo de la relación residuo a producto (RRP) propia de cada residuo. Así mismo, se realizó una caracterización fisicoquímica a la biomasa residual agrícola (BRA), basada en el análisis elemental, análisis próximo y análisis estructural. La BRA de los cultivos de maíz, arroz, caña panelera, plátano, banano, yuca, borjón y palmito, seleccionada en los departamentos de estudio, ofreció un total de 1.621 kt/año de residuos agrícolas de cosecha. Estos aportaron un potencial energético de 1.001 TJ/año. Finalmente se desarrolló un análisis multivariante a partir de la caracterización fisicoquímica de la BRA estudiada, con el fin de identificar el tipo de proceso de conversión energética más favorable para cada residuo. Se determinó que los mejores residuos para ser aprovechados mediante procesos termoquímicos fueron: podas de borjón de Chocó, rastrojo de maíz del Meta y Caquetá, y rastrojo de yuca de Caquetá. Así mismo, se demostró que el vástago de plátano de Caquetá, Chocó y Putumayo, y el vástago de banano del Chocó es más favorable aprovecharlos energéticamente mediante procesos bioquímicos.

* Trabajo de Investigación de Maestría en Ingeniería Química.

** Facultad de Ingenierías Fisicoquímicas. Escuela de Ingeniería Química. Director: Viatcheslav Kafarov, Ph.D.

ABSTRACT

TITLE: ASSESSMENT OF AGRICULTURAL RESIDUES AVAILABILITY AND ENERGY POTENTIAL ON ZNI OF COLOMBIA: CASE STUDY *

AUTOR: LEIDY KATHERINE RODRÍGUEZ CÁCERES**

KEYWORDS: Isolated areas, agricultural residues, energy potential, physicochemical properties, energy conversion.

In Colombia's Non-Interconnected Zones (ZNI), a large amount of agricultural and forestry waste is generated, most of which are not having any use and could be exploited in the generation of electricity. However, to develop future rural energization projects from residual biomass, it is necessary to have updated information of the physicochemical properties and the energy potential of the biomass available in these areas. Therefore, the energy potential of representative agricultural residues was evaluated in four departments of the ZNI of Colombia (Caquetá, Chocó, Meta and Putumayo), which presented high values of energy demand. This potential was calculated using a mathematical model that involves the mass of the agricultural residue and its energy content; as important factor the residue-to-product ratio (RPR) of each residue was calculated. Also, a physicochemical characterization was applied to the agricultural residues, based on elemental analysis, proximate analysis and structural analysis. Residues of maize, rice, cassava, banana, plantain, cassava, borojó and palmetto crops, selected in the study departments, provided a total of 1,621 kt/year of agricultural residues. These contributed an energy potential of 1,001 TJ/year. Finally, a multivariate analysis was developed based on the physicochemical characterization of agricultural residues studied, to identify the most favorable type of energy conversion process for each residue. The best residues to be exploited by thermochemical processes were: borojó pruning from Chocó, corn stover from Meta and Caquetá, and cassava stover from Caquetá. In the same way, it was demonstrated that the plantain stem from Caquetá, Chocó and Putumayo, and the banana stem from Chocó can be used energetically through biochemical processes.

* M.Sc. Chemical Engineering Research Work.

** Physical chemistry Engineering Faculty. Chemical Engineering School. Advisor: Viatcheslav Kafarov, Ph.D.

INTRODUCCIÓN

Actualmente se calcula que el 17% de la población mundial, que corresponde a 1.200 millones de personas, no tiene acceso a la electricidad (IEA, 2015). Para Colombia, aproximadamente el 35% de la población perteneciente a las Zonas no Interconectadas (ZNI) aún no poseen el servicio de energía eléctrica (IPSE, 2015).

Por sus características fisicoquímicas y caloríficas, la biomasa residual es una de las posibles soluciones para la generación de energía eléctrica en regiones aisladas. A su vez, contribuye a la mitigación del impacto ambiental que generan los combustibles fósiles, por la reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero. Una de las ventajas para su uso en estas zonas es que no compiten directamente con las grandes centrales hidroeléctricas y térmicas, porque se encuentran aisladas de la red de servicio que estas ofrecen (Lora & Andrade, 2009).

Colombia posee gran cantidad de recursos renovables que pueden ser empleados ampliamente en diferentes tecnologías de conversión energética. La Unidad de Planeación Minero Energética (UPME) ha identificado estos recursos potenciales y los han plasmado en herramientas tales como el atlas del potencial energético de la biomasa residual en Colombia. Sin embargo, es necesario que el país cuente con información actualizada de estos recursos, en especial para las ZNI de Colombia (UPME, 2010).

Un factor clave para determinar si un recurso es útil para ser empleado en generación de energía es conocer su potencial energético. Actualmente se han desarrollado diferentes metodologías de evaluación de estos potenciales, las cuales tienen en cuenta diferentes factores tales como: área cosechada, rendimiento del cultivo, residuos generados, usos competitivos, entre otros.

De la misma manera, es importante conocer las propiedades fisicoquímicas de la biomasa residual para tener un indicio de la tecnología que se puede emplear para su aprovechamiento energético.

En el presente trabajo de investigación se evaluó la demanda energética de los principales departamentos de las ZNI de Colombia, como casos de estudio. Posterior a esto, se seleccionaron los cultivos más representativos de las zonas de estudio y los residuos agrícolas generados en cosecha. A esta biomasa residual agrícola se le realizó una caracterización fisicoquímica y se le determinó su potencial energético técnico, mediante un modelo matemático que tuvo en cuenta la masa de residuo y su contenido energético. Finalmente, se realizó un análisis de componentes principales para identificar el proceso de aprovechamiento energético más adecuado para cada residuo, con base en sus propiedades fisicoquímicas.

2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Las Zonas No Interconectadas (ZNI) corresponden a los municipios, corregimientos, localidades y caseríos que no están conectados al Sistema Interconectado Nacional (SIN) de energía. En Colombia estas zonas actualmente abarcan 17 departamentos con 5 capitales departamentales, y representan el 52% de todo el territorio nacional.

Las ZNI se caracterizan por su baja densidad poblacional, por necesidades básicas insatisfechas mayores al 77%, por estar ubicadas a una larga distancia de los centros urbanos, por la dificultad de acceso, baja capacidad de pago, altos costos de prestación de energía eléctrica y por su gran riqueza de recursos naturales (IPSE, 2015). En consecuencia, el Instituto de Planificación y Promoción de Soluciones Energéticas para las Zonas no Interconectadas (IPSE), a lo largo de los últimos años ha implementado proyectos de energización rural, mediante la extensión de redes, sistemas locales de plantas diésel, sistemas solares fotovoltaicos y pequeñas centrales hidroeléctricas. Sin embargo, un 35% de la población de las ZNI, equivalente a 431.901 habitantes, aún no posee el servicio de energía eléctrica (IPSE, 2015).

Basados en lo anterior, es evidente la necesidad de identificar soluciones energéticas, con énfasis en energías renovables, que promuevan la reducción del déficit de cobertura de energía eléctrica en las ZNI y que ayuden a mitigar los impactos negativos que generan los combustibles fósiles como el diésel. Lo anterior, sumado a la premisa de que el país tiene como meta para el año 2020 una participación del 30% de Fuentes No Convencionales de Energía (FNCE) en las ZNI según el programa de uso racional y eficiente de la energía y demás formas de energía no convencionales (PROURE) (UPME, 2010).

En la mayoría de los departamentos que conforman las ZNI se cuenta con una amplia disponibilidad de recursos en biomasa residual, proveniente de actividades

agrícolas, industriales y forestales, a los que no se les está dando un uso adecuado y productivo (CORPOEMA, 2010). Por lo tanto, es necesario disponer de información actualizada y real de las características fisicoquímicas y energéticas de la biomasa residual presente en dichas zonas, para establecer un escenario base a partir del cual se puedan desarrollar posteriores estudios de energización rural basados en este tipo de energía renovable.

Por lo anterior, el presente trabajo de investigación plantea la identificación y selección de diferentes tipos de biomasa residual agrícola representativos de algunas ZNI y la determinación de su potencial energético y caracterización fisicoquímica. Esto con el fin de proveer información útil para futuros proyectos de investigación e inversión en procesos de conversión energética y energización en las regiones. Así mismo, se busca promover el uso de fuentes de energía renovable, que sean amigables con el medio ambiente y que estén disponibles en la región.

3. MARCO TEÓRICO Y ESTADO DEL ARTE

3.1 ZONAS NO INTERCONECTADAS DE COLOMBIA

En Colombia el suministro de energía eléctrica depende del Sistema de Interconexión Nacional (SIN) y principalmente se abastece a través de la generación por plantas hidroeléctricas y generación térmica proveniente de combustibles fósiles.

Según el Artículo 1º, Ley 855 de 2003: “Para todos los efectos relacionados con la prestación del servicio público de energía eléctrica se entiende por ZNI a los municipios, corregimientos, localidades, y caseríos no interconectados al SIN”.

Las ZNI se caracterizan por su baja densidad poblacional, por estar ubicadas a una larga distancia de los centros urbanos, por la dificultad de acceso y por su gran riqueza de recursos naturales. No obstante, la principal dificultad que enfrentan dichas zonas es que el servicio de energía eléctrica no es permanente o incluso es nulo (Flórez, *et al.*, 2009; Franco, *et al.*, 2008).

La opción más utilizada en los planes de electrificación rural ha sido la extensión de las redes existentes a los asentamientos aislados. Sin embargo, esta opción muy fiable, ha sido descartada en muchas ocasiones debido a la alta inversión que necesita a causa de las grandes distancias que separan los asentamientos, que no presentan una demanda significativa y mantienen un patrón disperso. Cuando no es posible la extensión de la red, se suelen considerar los sistemas autónomos. Por ejemplo, la instalación de sistemas diésel, caracterizados por ser fiables y tener baja inversión inicial, pero que generan altos costos de operación y mantenimiento, lo que puede limitar o incluso suspender su uso. En estos casos, los sistemas autónomos basados en energías renovables son una opción atractiva, tanto desde el punto de vista de su adecuación, como de la independencia energética y la reducción de emisiones (Pinedo, 2010).

En las ZNI son mayores las posibilidades de implementar proyectos de energización a partir de fuentes no convencionales de energía. Estas zonas constituyen uno de los nichos de mercado más importantes para estas energías, así como para mitigar el alto nivel de pobreza. En la mayoría de los departamentos que conforman las ZNI se cuenta con una amplia disponibilidad de recursos en biomasa residual, proveniente de actividades agrícolas, industriales y forestales, a los que no se les está dando un uso adecuado y productivo (CORPOEMA, 2010).

En Colombia, el Instituto de Planificación y Promoción de Soluciones Energéticas para las Zonas no Interconectadas (IPSE) es la entidad encargada de mejorar las condiciones de vida de las comunidades, promoviendo soluciones energéticas estructurales. Como ejemplo de los proyectos basados en FNCE que se han implementado, se puede mencionar el parque eólico Jepirachi en la Guajira y el gasificador piloto a partir de biomasa ubicado en el municipio de Necoclí (MME, 2011). No obstante, los proyectos en los que se ha utilizado biomasa son muy pocos comparado con la cantidad de residuos biomásicos presentes en las ZNI que no están siendo aprovechados para usos energéticos.

3.2 LA BIOMASA COMO RECURSO ENERGÉTICO

La biomasa es el material orgánico no fosilizado y biodegradable originado a partir de plantas, animales y microorganismos (Carneiro & Ferreira, 2012; BEC, 2011).

En el contexto del uso de biomasa para energía o bioenergía, el término de biomasa se usa frecuentemente para referirse al material orgánico basado en plantas, pero esta definición igualmente se refiere a material orgánico de origen vegetal y animal. Con base en lo anterior y como se observa en la figura 1, la biomasa para energía incluye un amplio rango de materiales tales como: madera virgen, madera derivada de las actividades forestales, residuos derivado de la transformación de la madera; residuos agrícolas de cosecha o industriales; residuos de fabricación, preparación y procesamiento de alimentos y bebidas, y residuos post-

consumo; desechos domésticos y municipales; y estiércol animal (Roberts *et al.*, 2015). Estos materiales contienen energía química que puede ser liberada directamente por la combustión, o alternativamente, ser convertida a otras fuentes de energía, las cuales pueden ser utilizadas para satisfacer una variedad de necesidades de energía, incluyendo la generación de electricidad, calefacción de viviendas, combustible para vehículos y generación de calor para procesos industriales (Roberts *et al.*, 2015; Carneiro & Ferreira, 2012).

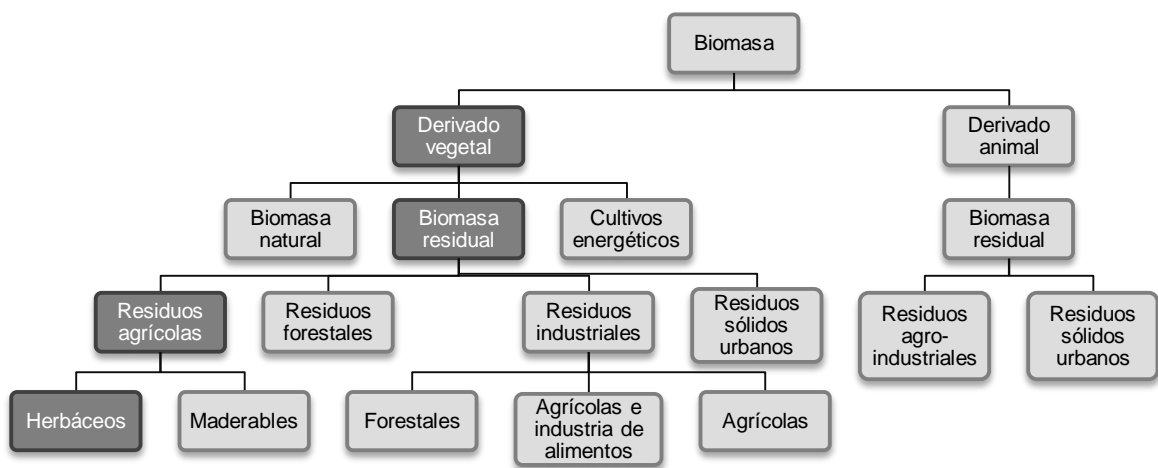


Figura 1. Clasificación de la biomasa según su origen. Fuente: Adaptado de Roberts *et al.*, 2015.

En el marco de las fuentes de energía renovables, las fuentes de biomasa, probablemente, son un ejemplo del factor de crecimiento ligado a la economía verde, que influye en las inversiones con resultados positivos en cuanto a la protección del suelo, la gestión sostenible de los recursos agroforestales y la puesta en marcha de nuevas actividades de negocio efectivas, contrario a las inversiones en energía solar y eólica, que suelen ser de alta inversión en capital, altamente rentable y de baja mano de obra. El aspecto positivo en la producción y el uso de la biomasa está vinculado al impacto positivo a nivel local en términos de desarrollo y

empleo, cuidado del territorio y mantenimiento además de la optimización de los recursos agroforestales (Chinnici, *et al.*, 2015).

3.2.1 Evaluación del potencial energético

El único recurso natural y renovable a base de carbono que es lo suficientemente amplio para ser utilizado como un sustituto de los combustibles fósiles es la biomasa. A diferencia de los combustibles fósiles, la biomasa es renovable en el sentido de que sólo se necesita un período corto de tiempo para reemplazar lo que se utiliza como fuente de energía (Roberts *et al.*, 2015).

Actualmente, la biomasa proporciona alrededor de 50 EJ a nivel mundial, lo que representa el 10% del consumo anual de energía primaria global, que en su mayoría, corresponde a biomasa tradicional utilizada en cocción y calefacción (WEC, 2013). Por otra parte, según Manzano *et al.* (2013), el 56% de las investigaciones hechas en energías renovables a nivel mundial corresponde a estudios de biomasa, presentando una tasa de publicación exponencial a partir del año 1991. Los países que tienen la mayor contribución en este campo son los EE.UU., el Reino Unido, Canadá, Alemania y Francia, sin embargo, estas investigaciones en su mayoría son estudios sobre biomasa proveniente de cultivos energéticos y no de biomasa residual.

No obstante, se pueden encontrar diversos estudios enfocados en la evaluación de disponibilidad de biomasa residual y su potencial energético, aspectos necesarios para conocer la factibilidad del uso de biomasa como recurso energético.

Scarlat, *et al.* (2010) llevaron a cabo una evaluación basada en el recurso de la disponibilidad de residuos de cultivos agrícolas para producción de bioenergía en la Unión Europea, a nivel de los 27 estados miembros. Se estudiaron los 8 cultivos más representativos de la zona de estudio para un periodo de 10 años (1998 - 2007). La estimación fue hecha teniendo en cuenta factores como: Tipos de cultivo y área de producción de cultivo, rendimiento del cultivo, relación residuo a rendi-

miento, tasa de remoción de residuo de acuerdo a las limitaciones ambientales y a los requerimientos para la conservación del suelo, y usos competitivos de los residuos. Los autores establecen que el uso de residuos de cultivos agrícolas para la producción de bioenergía requiere de datos precisos de su disponibilidad por tipo de cultivo y también de su variabilidad local y anual. Así mismo declaran que hay un número de aspectos que deben ser considerados como: recursos (cantidad, variación del rendimiento multi - anual), logístico (demanda de energía en el área, almacenamiento, seguridad de suministro, periodo de recolección, distancia de transporte), tecnológico (tecnologías disponibles), económico (costos de recursos y energía) y social (percepción y actitud de los agricultores).

Batidzirai, *et al.* (2012) realizaron una revisión del estado del arte de la estimación de los potenciales energéticos de la biomasa. Ellos establecen que tales potenciales tienen mucha variabilidad debido a las múltiples metodologías, bases de datos y suposiciones que se utilizan. Los autores identificaron cinco tipos de metodologías de evaluación de disponibilidad energética que van desde métodos estadísticos simples a modelos explícitos espacialmente más complejos. Así mismo, identificaron algunos elementos claves al momento de realizar una evaluación bioenergética: Demanda de biomasa para alimentos y materiales, disponibilidad de tierra, rendimientos, agua, suelo, biodiversidad y cambios climáticos. En cuanto al potencial energético definen cinco tipos de potenciales a saber: Potencial teórico, potencial técnico, potencial económico, potencial ecológicamente sostenible y potencial de aplicación.

Por su parte, Shonhiwa (2013) exploró la magnitud de biomasa disponible para producción de energía usando tecnologías de conversión termoquímica en Zimbabwe. La metodología utilizada se dividió en tres partes: 1) Recolección de datos de producción de biomasa, 2) elaboración de supuestos de las características de la biomasa basado en estudios previos y 3) desarrollo de un modelo numérico en Microsoft Excel para calcular el potencial energético.

Kemausuor, *et al.* (2014) evaluaron la contribución del potencial de bioenergía para satisfacer la demanda de energía en Ghana utilizando biocombustibles (biogás y etanol celulósico) obtenidos a partir de residuos de cosecha, residuos animales, residuos forestales y residuos municipales.

Lourinho & Brito (2015) evaluaron el potencial de residuos agrícolas y forestales para generación de electricidad en Alto Alentejo, Portugal. El modelo desarrollado tuvo un enfoque basado en los recursos y la estimación del potencial técnico se realizó a partir de datos estadísticos y geográficos actuales.

Respecto a la identificación del potencial energético en Colombia se han realizado diferentes estudios por parte de entidades nacionales y extranjeras.

En el 2003, Aene Consultoría S.A. realizó un estudio para la UPME denominado Potencialidades de los Cultivos Energéticos y Residuos Agrícolas en Colombia, cuyo objetivo fue realizar un inventario de los cultivos y residuos de biomasa, y determinar su potencial energético (Aene, 2003). En 2007 Kline y colaboradores desarrollaron un estudio titulado *Biofuels Feedstock Assessment for Selected Countries*, cuyo objetivo fue identificar el potencial a nivel mundial para producir biocombustibles con un enfoque en las importaciones de EE.UU.; Colombia estuvo dentro de los países seleccionados, con la caña de azúcar y la palma de aceite como objeto de estudio (Kline *et al.*, 2007). Por su parte, Arias *et al.* (2008) en el marco del proyecto *Biofuels Assessment on Technical Opportunities and Research Needs for Latin America* identificaron el potencial de producción y potencial energético de diferentes cultivos y residuos para su posible uso en la producción de biocombustibles. El trabajo más reciente es el Atlas del Potencial Energético de la Biomasa Residual en Colombia realizado por Escalante, *et al.* (2011), en el cual se desarrollaron modelos matemáticos para evaluar el potencial energético de la biomasa residual agrícola, de residuos de animales y de residuos urbanos, proporcionando datos a nivel departamental y nacional.

En los cuatro estudios se estimó el potencial energético teórico y solo tres de ellos estimaron también el potencial energético técnico. A través de todos los estudios se observa que las cinco categorías de biomasa más relevantes fueron: residuos agrícolas, residuos animales, forestal e industria de la madera, biocombustibles y residuos urbanos. La metodología predilecta a través de los estudios fue el enfoque centrado en los recursos que emplea el análisis estadístico. Esta metodología fue empleada en los cuatro informes y en Escalante *et al.* (2011) se combinó con un análisis espacialmente explícito para ofrecer resultados regionales (González *et al.*, 2014). Cabe destacar que en ninguno de los trabajos anteriormente mencionados se usó la relación residuo a producto propia de cada residuo en las regiones estudiadas, para el cálculo del potencial energético. Así mismo, no se tuvo en cuenta el factor de disponibilidad del residuo por usos competitivos.

Según el informe del *World Energy Council* (2013), para lograr los objetivos planteados para los potenciales de bioenergía a largo plazo, es necesario que las políticas del gobierno y los esfuerzos industriales sean dirigidos a aumentar los niveles de rendimiento de biomasa y la modernización de la agricultura en regiones como África, el Lejano Oriente y América Latina, lo que aumenta directamente la producción mundial de alimentos y por lo tanto los recursos disponible para biomasa. Esto puede lograrse mediante el desarrollo tecnológico y la difusión de mejores prácticas de agricultura sostenible, y que adicionalmente, se promueva a nivel mundial el uso sostenible de residuos y desechos para bioenergía.

3.2.2 Caracterización de biomasa residual agrícola

La diversidad de recursos biomásicos disponibles para bioenergía hace que sea de suma importancia hacer una caracterización detallada de los mismos para determinar sus propiedades, calidad, aplicaciones potenciales y los problemas medioambientales relacionados con cualquier combustible (Vassilev *et al.*, 2010; Ruíz *et al.*, 2013).

Las características más importantes de un combustible se pueden determinar mediante el análisis de su valor calorífico, el análisis próximo y elemental, y el punto de fusión de la ceniza (Khan *et al.*, 2009). El análisis próximo es usado para determinar los porcentajes en peso de la humedad, materia volátil, carbono fijo y cenizas de la biomasa, mientras que el análisis elemental es usado para determinar los porcentajes en peso del carbono, hidrógeno, nitrógeno, oxígeno y sulfuro de la biomasa (Yin, 2011).

El poder calorífico (PC) de un combustible, tal como la biomasa, representa su contenido energético. Este se define como el calor liberado por la combustión completa de una unidad de volumen del combustible a 1 bar (101.325 Pa), considerando que los reactivos y productos estén a la misma temperatura de referencia (Chadwick *et al.*, 2014; Peduzzi *et al.*, 2016). Al comparar los diferentes tipos de biomasa, el PC se encuentra con un valor promedio de 18 MJ/kg para muestras con un bajo contenido de humedad y cenizas. El PC tiene una correlación negativa respecto al contenido de humedad. Su valor se disminuye debido al calor liberado durante la combustión usado para la evaporación de la humedad presente en el material, así mismo, una alta cantidad de humedad ocasiona problemas con la ignición dando lugar a ineficiencias en la combustión (Chadwick *et al.*, 2014; Nankomcic - Smaragdakis *et al.*, 2016).

Generalmente el contenido de humedad de la biomasa está entre 10 – 70% (Vargas *et al.*, 2012; Akhtar *et al.*, 2012). Altos contenidos de humedad y oxígeno hacen que el poder calorífico de la biomasa sea menor comparado con otros combustibles y genera problemas en la combustión.

El porcentaje de sólidos totales (ST) es un factor importante a considerar en el uso de procesos bioquímicos como la digestión anaerobia. La movilidad de las bacterias metanogénicas dentro del sustrato se ve crecientemente limitada a medida que se aumenta el contenido de sólidos y por lo tanto puede verse afectada la eficiencia y producción de gas (MINENERGÍA, 2011). Dependiendo del contenido de

sólidos totales la digestión anaerobia se clasifica en dos grupos: para contenidos de ST menores a 15% se denomina digestión anaerobia líquida, y para contenidos de ST mayores a 15% es conocida como digestión anaerobia en estado sólido (Li *et al.*, 2011; Brown *et al.*, 2012). Esta última es ideal para materias primas como: cultivos energéticos, residuos agrícolas, residuos alimenticios, entre otros (Sawatdeenarunat *et al.*, 2015).

En base seca libre de cenizas el contenido de material volátil en la biomasa varía en el intervalo de 48 – 86%. En contraste, el valor de material volátil para el carbón está comúnmente en el rango de 10 – 68% (Vargas *et al.*, 2012; Pang *et al.*, 2014). El alto contenido de sólidos volátiles (SV) es una de las más grandes ventajas que presenta la biomasa frente a los combustibles fósiles en procesos de conversión termoquímica. Este alto contenido permite: baja temperatura de ignición; ignición, desvolatilización y quema más fácil y rápida; mayor producción de gas combustible y vapores inorgánicos; combustión mejorada; formación de *biochar* con alta área superficial específica, entre otros (Vassilev *et al.*, 2015). Así mismo, un alto contenido de SV permite una buena producción de gas metano en el proceso de digestión anaerobia (MINENERGÍA, 2011).

Por su parte, el contenido de ceniza varía de menos de 1% (para ciertos tipos de madera) hasta 30 o 40% (residuos de cultivos en invernadero) (% en peso en base seca) y difiere dependiendo de la especie, la edad del material vegetal utilizado, la parte de la planta utilizada y el nivel de contaminación de la tierra en la que la planta creció (Vargas *et al.*, 2012). Las cenizas y los elementos inorgánicos producidos durante la combustión pueden causar serios problemas para las plantas de energía debido a la formación de escoria y corrosión (Monti *et al.*, 2008). Así mismo, el poder calorífico tiene una correlación negativa respecto a la cantidad de cenizas (Chadwick *et al.*, 2014).

La composición elemental de un combustible de biomasa es una de sus características más importantes. La concentración de carbono influye proporcionalmente

en el poder calorífico superior de la biomasa. Cuanto mayor es la relación H + C/O de un combustible, mayor es su poder calorífico superior (Vargas *et al.*, 2012). Por otra parte, las concentraciones de nitrógeno y azufre son particularmente importantes en términos de protección ambiental, y es necesario que estos materiales sean tratados con precaución, debido a la emisión de gases contaminantes (NO_x, SO_x) y a los problemas de corrosión de los equipos (Telmo *et al.*, 2010; Pécora *et al.*, 2014). Generalmente, el contenido de carbono de la biomasa está en el rango de 42 - 71%, el hidrógeno en el rango de 3 - 11%, el oxígeno en el rango de 16 - 49%, los valores de nitrógeno fluctúan entre 0,1 y 12% y el azufre se encuentran entre 0.01 - 2.3% (% en peso seco libre de cenizas) (Vassilev *et al.*, 2010; Vargas *et al.*, 2012; Pécora *et al.*, 2014).

Cada biomasa tiene un perfil de descomposición único el cual depende de su composición lignocelulósica. El contenido de celulosa generalmente se encuentra en el rango de 25 a 50% en peso, el contenido de hemicelulosa entre 15 - 40% y el rango de lignina entre 10 a 40% (Kan *et al.*, 2016). La lignina es más difícil de descomponer debido a su estructura estable, por lo tanto, tiene una resistencia térmica mayor comparada con la celulosa y hemicelulosa (Pang *et al.*, 2014). En la pirólisis de biomasa, la celulosa y hemicelulosa contribuyen al rendimiento de la producción de bio-oil, mientras que la lignina produce mayor proporción de carbón sólido o biochar (Akhtar *et al.*, 2012).

3.2.3 Tecnologías de conversión

La biomasa debe ser sometida a varios procesos de transformación de forma que pueda ser ampliamente utilizada como fuente de energía. Estos procesos transforman su energía acumulada (carbono e hidrógeno) en combustibles sólidos, líquidos y gaseosos que a su vez se transformarán en calor o electricidad (Lora & Andrade, 2009). En la conversión de la biomasa en energía se distinguen tres grandes procedimientos de transformación, denominados: conversión termoquímica, conversión bioquímica y conversión física.

En la Figura 2 se presentan las principales rutas de conversión de biomasa que se utilizan o están en desarrollo para la producción de calor, electricidad y combustibles para transporte.

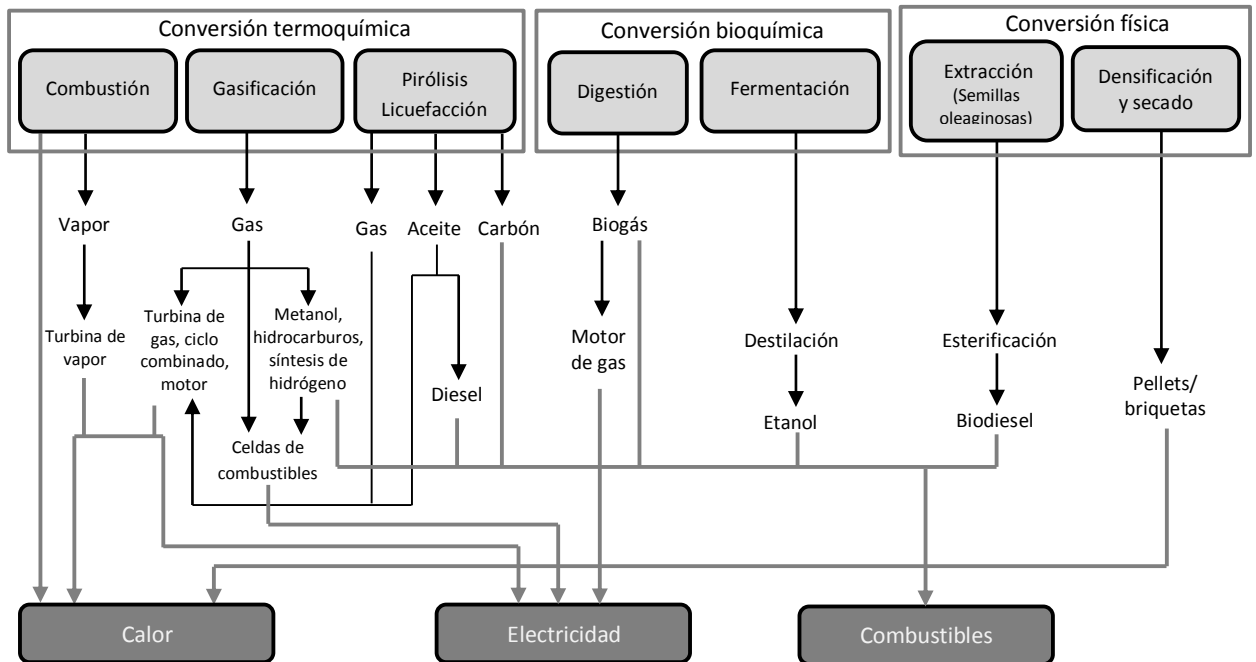


Figura 2. Principales rutas de conversión de biomasa. Fuente: Adaptado de Faaij, A., 2006 y Lora & Andrade, 2009.

En la conversión termoquímica, la biomasa es sometida a alta temperatura favoreciendo la producción de reacciones de oxidación parcial (gas de gasógeno), completa (combustión en ciclo vapor) o en presencia de otros agentes que no sea aire (gas de síntesis), con el fin de ser transformada en un combustible sólido, líquido o gaseoso portador de la energía. Se incluyen dentro de la conversión termoquímica los procesos de pirólisis, gasificación, combustión, co - combustión, licuefacción y carbonización (Acevedo, 2006; Patel *et al.*, 2016).

Por su parte, la conversión bioquímica se caracteriza por la acción de diversos tipos de microorganismos que pueden estar presentes en la biomasa o son adicio-

nados durante el proceso, generando una degradación de las moléculas de alta complejidad a compuestos más simples con alto potencial energético. Su empleo se centra principalmente en la biomasa con alto contenido de humedad. Los procesos de fermentación y digestión anaerobia se distinguen dentro de esta conversión obteniendo productos líquidos y gaseosos, respectivamente (Acevedo, 2006).

La conversión física comprende, como parte importante de la utilización de la biomasa, la extracción de aceite de semillas oleaginosas y su transformación en biodiesel mediante transesterificación del aceite vegetal (Acevedo, 2006), y la peletización que consiste en el secado y prensado de la biomasa bajo alta presión para producir piezas cilíndricas de biomasa comprimida y extruida (Uslu *et al.*, 2008). Esta última, tiene como ventaja una mayor densidad volumétrica de energía en comparación con las virutas de madera y por lo tanto son más eficientes para almacenar, transportar y convertir en energía. La peletización no sólo produce un combustible uniforme y estable, sino que también minimiza la cantidad de polvo producido (Uslu *et al.*, 2008).

En el presente trabajo de investigación solo se tendrán en cuenta, para el análisis de las propiedades fisicoquímicas de la biomasa residual agrícola, las tecnologías de conversión termoquímica y bioquímica.

3.2.4 Análisis de componentes principales

El análisis de componentes principales (PCA) es un método de análisis multivariante que permite reducir la cantidad de datos para analizar la mayor proporción de variación que sea posible cuando hay correlaciones presentes. Esto, mediante un cambio de la dimensionalidad de los datos usando combinaciones lineales de las variables originales. La idea detrás del PCA es encontrar los componentes principales $Z_1, Z_2, Z_3 \dots Z_n$ que corresponden a combinaciones lineales de las variables originales $X_1, X_2, X_3 \dots X_n$, que describen a cada espécimen (Miller & Miller, 2010). Y para esto la pregunta que resuelve es: ¿Habrà una base que mediante

combinaciones lineales de las bases originales se pueda re-exresar todo el set de datos de una mejor manera? (Shlens, 2005). La ecuación matricial que representa un cambio de base corresponde a la Ecuación 1:

$$PX = Y \quad \text{Ec. 1}$$

$$PX = \begin{bmatrix} p_1 \\ \vdots \\ p_m \end{bmatrix} [x_1 \quad \dots \quad x_n]$$

$$Y = \begin{bmatrix} p_{1..}x_1 & \dots & p_{1..}x_n \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ p_{m..}x_1 & \dots & p_{m..}x_n \end{bmatrix}$$

Donde: X es la matriz de datos originales o base original, Y es la matriz de las nuevas variables o nueva base y P es la matriz que relaciona linealmente a X con Y. Supóngase entonces que se tiene la matriz de datos X. El objetivo será encontrar una matriz P que permita que la matriz de covarianza para PX sea una matriz diagonal cuyas entradas en la diagonal estén en orden descendente. Si se logra esto, PX o Y, serán los nuevos datos; las nuevas variables serán combinaciones lineales de las variables cuyos pesos estarán dados por P. Debido a que la matriz de covarianza para PX es diagonal, la covarianza entre cada par de distintas variables es cero, y la varianza de cada una de las nuevas variables estarán listadas a lo largo de la diagonal en orden descendente (Mankin, E., [en línea]). La representación algebraica de esto corresponde a las Ecuaciones 2 y 3 donde se representa también la fórmula que define la covarianza de una matriz de datos.

$$Cov(PX) = \frac{1}{n-1} (PX)(PX)^T \quad \text{Ec. 2}$$

$$Cov(PX) = \begin{bmatrix} Var_1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & Var_2 & 0 & \vdots \\ \vdots & 0 & \ddots & 0 \\ 0 & \dots & 0 & Var_n \end{bmatrix} \quad \text{Ec. 3}$$

Diferentes herramientas estadísticas computacionales que resuelven este problema mediante la aplicación sencilla de operaciones matriciales del álgebra lineal se encuentran disponibles. En este trabajo se usó para este propósito el software Statgraphics Centurion XV.

4. HIPÓTESIS

Es posible realizar una evaluación de la demanda energética y la disponibilidad de biomasa residual agrícola en algunas ZNI de Colombia para uso en bioenergía mediante la recolección, manejo y clasificación de datos característicos de los departamentos y el cálculo del potencial energético basado en la masa residual y su contenido energético.

5. OBJETIVOS

5.1 OBJETIVO GENERAL

Evaluar la demanda energética y la disponibilidad de biomasa residual agrícola en ZNI de Colombia para uso en bioenergía mediante la recolección, manejo y clasificación de datos característicos de los departamentos y el cálculo del potencial energético en función de la masa residual y su contenido energético.

5.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- A partir de bases de datos existentes, determinar la demanda energética con el propósito de delimitar el área de estudio en las ZNI, a cuatro departamentos, mediante cálculos basados en el número de habitantes por vivienda y su consumo de energía promedio en dichas zonas.
- Identificar las principales fuentes de biomasa residual agrícola en las ZNI previamente escogidas, con el fin de seleccionar ocho cultivos representativos, mediante la recolección de datos proporcionados por entidades gubernamentales y privadas.
- Determinar el potencial energético de los residuos de cosecha de los cultivos seleccionados, mediante el uso de un modelo matemático que involucre la masa del residuo y su poder calorífico inferior (PCI).
- Desarrollar un análisis multivariante a partir de la caracterización fisicoquímica de la biomasa residual agrícola estudiada con el fin de identificar el tipo de proceso de conversión energética más favorable para cada residuo.

6. METODOLOGÍA

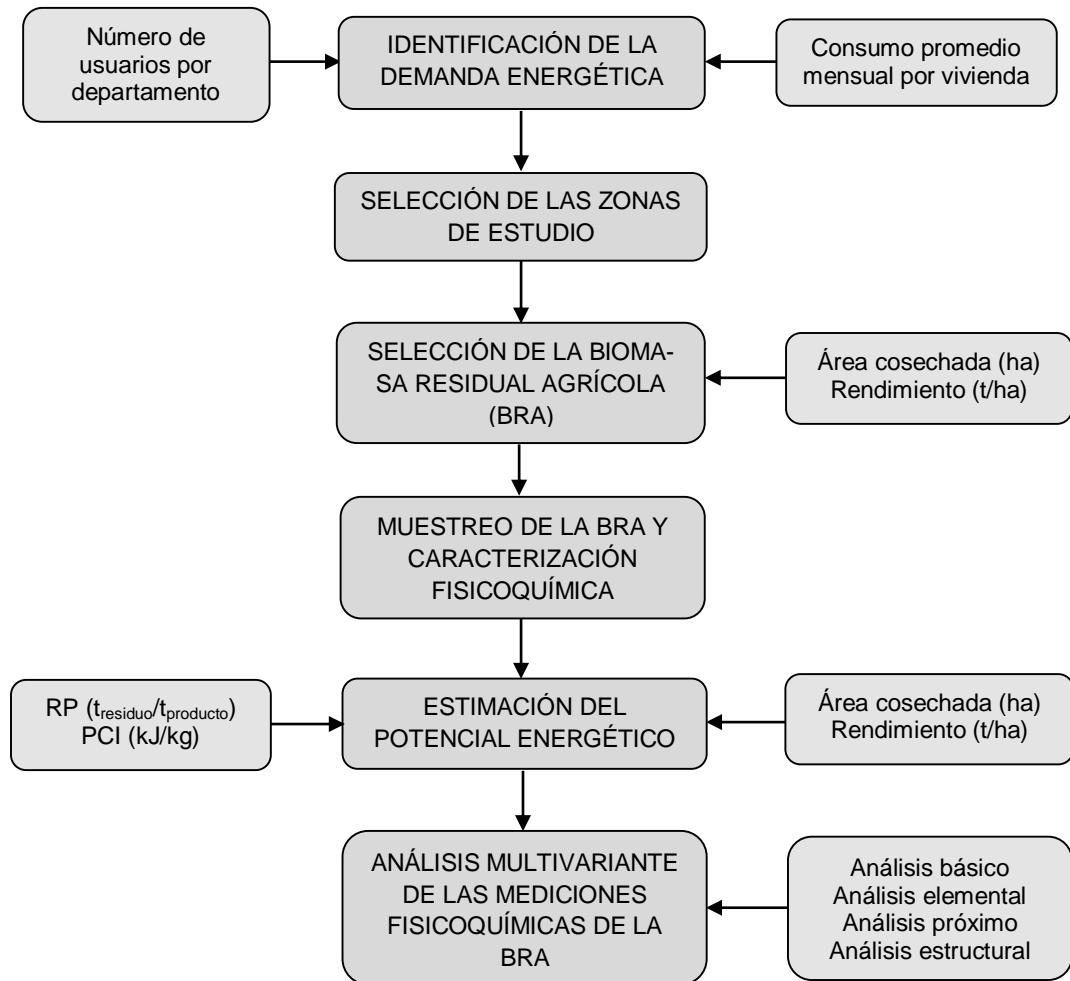


Figura 3. Diagrama de flujo de la metodología desarrollada en el trabajo.

La metodología desarrollada se estableció en etapas orientadas a evaluar el potencial energético de la biomasa residual agrícola en cuatro departamentos pertenecientes a las ZNI de Colombia, como se expone en la Figura 3.

Batidzirai *et al.* (2012) realizaron una revisión del estado del arte de la estimación de los potenciales energéticos de la biomasa. Ellos determinaron que los potenciales son calculados con mucha variabilidad debido a las múltiples metodologías,

bases de datos y suposiciones que se utilizan. Los autores identificaron cinco tipos de metodologías de evaluación de disponibilidad energética que van desde métodos estadísticos simples a modelos explícitos espacialmente más complejos. A modo general identificaron: la evaluación enfocada en el recurso, evaluación enfocada en la demanda y evaluación integrada (Batidzirai *et al.*, 2012; Portugal – Pereira *et al.*, 2015). En el presente trabajo se adoptó una evaluación basada en el recurso teniendo en cuenta las principales características de la biomasa, con el objeto de estimar el potencial energético técnico para la generación de energía eléctrica en ZNI.

6.1 CÁLCULO DE LA DEMANDA ENERGÉTICA Y SELECCIÓN DE LAS ZONAS DE ESTUDIO

La demanda energética de los departamentos pertenecientes a las ZNI en Colombia fue escogida como criterio de selección de los casos de estudio. Esta demanda energética se calculó mediante la Ecuación 4 (UPME, 2014). Donde D es la demanda anual de energía [GWh], U_{ZNI} es el número de usuarios por departamento pertenecientes a las ZNI, para este caso los usuarios son las viviendas que demandan el servicio. El valor $92 * 10^{-6}$ GWh/mes corresponde al supuesto de un consumo promedio mensual por vivienda.

$$D = U_{ZNI} * \left(\frac{92 * 10^{-6} \text{ GWh}}{\text{mes}} \right) * 12 \text{ meses} \quad \text{Ec. 4}$$

Los datos para U_{ZNI} se tomaron del documento "Cobertura de Energía Eléctrica a 2012" disponible en la página web de la UPME.

Según el PIEC 2013 – 2017, el consumo promedio mensual por vivienda se calculó a partir de la información reportada por cada uno de los Operadores de Red al Sistema Único de información –SUI-, para dicho cálculo se tomó de la información

dispuesta en la página de la SSPD la referente al tema Comercial Residencial, las variables consumo y número de usuarios, la cual se encuentra clasificada por municipio y por ubicación del usuario (Urbana, Rural y Centro Poblado). Sin embargo, dada la existencia de algunos datos atípicos en las zonas rurales de algunos municipios, se realizó el siguiente supuesto: En el caso que el valor del consumo de la zona rural supere el área urbana de un municipio, se cambió este valor por el 80% del consumo promedio de la zona urbana. La metodología utilizada para el cálculo de la energía promedio por usuario de un municipio, es dividir la energía reportada para la totalidad de los usuarios de un municipio por el número total de usuarios residenciales del mismo. Para el valor nacional se tomó el promedio de todos los municipios que reportaron información al SUI (UPME, 2014).

Una vez calculada la demanda energética para todos los departamentos de las ZNI, se seleccionaron los cuatro departamentos que presentaron el mayor valor de demanda.

6.2 IDENTIFICACIÓN DE LA BIOMASA RESIDUAL AGRÍCOLA (BRA)

La biomasa residual agrícola se conforma de los subproductos que se generan durante los procesos de recolección y transformación de las cosechas, definidos como residuos agrícolas de cosecha (RAC) y residuos agroindustriales (RAI). En el presente trabajo se seleccionaron solamente los RAC, porque los habitantes rurales pueden disponer directamente de ellos. Por el contrario, los residuos agroindustriales están fuera de su alcance porque, en su mayoría, son usados por las mismas industrias como subproductos o combustible.

Para seleccionar los RAC primero se realizó una recopilación de información, de todos los cultivos cosechados en las ZNI de los departamentos seleccionados. La información fue tomada de la BASE Evaluaciones Agropecuarias Municipales (EVA) 2007 – 2012 suministrada por la Red de Información y Comunicación del Sector Agropecuario Colombiano (AGRONET), para el año 2012 (MINAGRICUL-

TURA, 2013). Posteriormente se hizo una clasificación y selección de ocho cultivos representativos de los departamentos seleccionados teniendo en cuenta el área cultivada (ha) del año 2012. Se escogieron los cultivos que fueran generadores de RAC aprovechables y también algunos autóctonos de regiones con muy alta biodiversidad.

6.3 MUESTREO DE LA BIOMASA RESIDUAL AGRÍCOLA

Para la recolección de las muestras de los RAC de cada cultivo se llevaron a cabo cuatro salidas de campo, una por departamento. La selección de los municipios de muestreo se realizó teniendo en cuenta: mayor demanda energética en el departamento, fácil acceso y garantías de seguridad en cuanto a la presencia de grupos armados ilegales.

Para la recolección de las muestras se contó con el apoyo de funcionarios de las Unidades Municipales de Asistencia Técnica Agrícola (UMATA), estudiantes en práctica del SENA y los campesinos residentes en las fincas donde se realizó el muestreo.

En cada zona de estudio se recolectó aleatoriamente cerca de 1 kg de muestra por tipo de residuo en un espacio de aproximadamente 1 ha. Posterior al muestreo, los residuos se empacaron y almacenaron para ser enviados al laboratorio. Adicional a esto, en el lugar del muestreo se tomaron los datos de peso del residuo y peso del producto principal de cada cultivo con el fin de estimar la relación residuo a producto. En el Anexo A se presentan imágenes de la recolección de muestras realizada en los sitios de muestreo de cada departamento.

6.4 CARACTERIZACIÓN FÍSICOQUÍMICA DE LA BRA

Para conocer las propiedades fisicoquímicas de los RAC se realizaron los análisis básico, elemental, próximo, estructural y de poder calorífico a cada muestra reco-

lectada. En la Tabla 1 se describen las variables analizadas y los métodos utilizados para cada análisis.

Tabla 1. Caracterización fisicoquímica de la biomasa residual agrícola.

Tipo de Análisis	Variable	Método	Referencia
Análisis Básico	Humedad	Gravimetría	LBC 135
	Sólidos Totales	Gravimetría	LBC 135
Análisis Elemental	Carbono	---	NTC 5167
	Hidrógeno	Cálculos	---
	Oxígeno	Cálculos	---
	Nitrógeno	Volumetría	LBC 7 KJELDAHL
	Azufre	Turbidimetría	NTC 1174
Análisis Próximo	Sólidos Volátiles	Gravimetría	NTC 5167
	Cenizas	Gravimetría	LBC 137
	Carbono Fijo	Cálculos	---
Análisis Estructural	Lignina	---	NREL/ASE (Sluiter <i>et al.</i> , 2012)
	Celulosa	---	
	Hemicelulosa	---	
Contenido Energético	PCI	Cálculos	Fórmula de Dulong

En el Anexo B se describe el procedimiento analítico de laboratorio llevado a cabo para la determinación de carbohidratos estructurales y lignina en biomasa (análisis estructural) provisto por el Laboratorio “NREL” (Sluiter *et al.*, 2012).

A los residuos: rastrojo de maíz en Chocó y hojas y cogollos de caña panelera en Putumayo, no se les realizó análisis fisicoquímico, pero si se les calculó la relación residuo a producto. Para el cálculo del potencial energético de estos residuos se utilizaron los valores de humedad y poder calórico inferior de los respectivos residuos en Caquetá.

6.5 ESTIMACIÓN DEL POTENCIAL ENERGÉTICO

Los modelos matemáticos para evaluar el potencial energético de la biomasa se fundamentan en que la energía contenida en la materia es proporcional a su masa seca y por consiguiente puede expresarse en forma general como:

$$PE = (M_{RS}) * (E) \quad \text{Ec. 5}$$

Donde M_{RS} es la masa de residuo seco y E es la energía contenida (Orduz, 2011). El potencial energético técnico se calculó con base en el modelo matemático propuesto por Escalante *et al.* (2011) como lo indica la Ecuación 6. Donde PE es el potencial energético [TJ/año], RC es el residuo seco del cultivo [t], Y_r es la fracción de residuo seco [t residuo seco/t residuo húmedo], PCI es el poder calórico inferior [TJ/t] y D es el factor de disponibilidad de residuo.

$$PE = RC * Y_r * PCI * D \quad \text{Ec. 6}$$

El cálculo de la cantidad de residuo se realizó mediante la Ecuación 7. Donde RC es el residuo del cultivo [t], A es el área cosechada [ha/año], R es el rendimiento del cultivo [t producción/ha cultivada] y RRP es la relación de residuo a producto [t residuo/t producto].

$$RC = A * R * RRP \quad \text{Ec. 7}$$

Los valores de área cosechada (ha) y producción (t) fueron tomados para el 2015, último año registrado en las Evaluaciones Agropecuarias Municipales del Anuario Estadístico del Sector Agropecuario (MINAGRICULTURA, 2016), asegurando de esta manera que el potencial energético fuera calculado con datos actualizados.

Para este trabajo se consideró de gran importancia determinar experimentalmente los valores de la relación residuo a producto (RRP) de los RAC para los cultivos representativos de las zonas de estudio, porque esta relación varía significativamente de país a país, incluso de región a región. Esto depende de las prácticas locales agrícolas, de las condiciones climáticas, rendimientos de los cultivos, de las características del suelo, de la logística de recolección, entre otros. Adicional a esto, los datos de producción de cultivos son fácilmente asequibles, mientras que la información sobre los residuos, necesaria para calcular el RRP, es muy limitada o no se encuentra disponible (Angelis-Dimakis, *et al.*, 2011; Iye, *et al.*, 2013; Kemausuor, *et al.*, 2014; Qiu *et al.*, 2014). Para calcular el RRP, en el lugar de muestreo se seleccionaron aleatoriamente 5 plantas del cultivo y a cada una se le registró el peso del residuo generado y el peso del producto principal.

Por otra parte, el factor de disponibilidad supone que una parte de los residuos debe permanecer en el suelo de los cultivos para mantener la tierra fértil y otros usos competitivos en agricultura y propósitos industriales. Los residuos agrícolas ayudan a mitigar la erosión y protegen el suelo de la luz solar excesiva y la evaporación, además contribuyen a la recirculación de nutrientes y la fijación de la materia orgánica (Scarlat *et al.*, 2010; Portugal-Pereira, *et al.*, 2015; Ullah, *et al.*, 2015). De acuerdo con el levantamiento de información realizado mediante una plantilla descriptiva del sitio de muestreo (Anexo C), la mayor parte de los residuos generados son dejados en el suelo como abono, sin embargo, la principal razón es porque no conocen otra opción de aprovechamiento de estos residuos y por practicidad los desechan de esta manera, generando en ocasiones problemas fitosanitarios que afectan el cultivo. En este trabajo se consideró un factor de disponibilidad del residuo del 50%, teniendo como base la opinión de los campesinos administradores de los cultivos y diferentes estudios en la literatura en donde el factor de disponibilidad se encuentra dentro del intervalo de 30% a 60% (Scarlat *et al.*, 2010; Iye & Bilsborrow, 2013; Portugal-Pereira, *et al.*, 2015).

Por último, se calculó la energía eléctrica [GWh] que se podría generar a partir del potencial energético de los residuos agrícolas de cosecha teniendo en cuenta una eficiencia de conversión de energía del 30%, considerando un aprovechamiento energético de la biomasa mediante combustión o digestión anaerobia según McKendry (McKendry, 2002).

6.5.1 Representación cartográfica del potencial energético

Se elaboraron cuatro mapas, uno por departamento, en los que se representó espacialmente el potencial energético de los municipios pertenecientes a las ZNI de cada departamento. Debido a que no existe información disponible de la localización espacial de las áreas cultivadas, se representó el potencial de forma general en toda el área del municipio. Para la elaboración de estos mapas se empleó el software ArcGIS y se utilizó la cartografía oficial de la división política administrativa de Colombia, IGAC 2012.

6.6 ANÁLISIS MULTIVARIANTE ENFOCADO A LA IDENTIFICACIÓN DE LAS TECNOLOGÍAS DE APROVECHAMIENTO ENERGÉTICO PARA LA BRA

Con base en la caracterización fisicoquímica medida para cada uno de los residuos agrícolas de cosecha, se realizó un análisis multivariante inicial para determinar la correlación lineal entre todas las variables de la Tabla 1. También, debido a que se cuenta con información de más de una variable, fue posible calcular el coeficiente de correlación momento-producto de Pearson para cada par de variables (Miller & Miller, 2010). Un análisis de componentes principales fue empleado con el propósito de obtener un número reducido de combinaciones lineales de las variables que expliquen la mayor variabilidad en los datos iniciales medidos (Miller & Miller, 2010). La proximidad entre los diferentes residuos graficados en las coordenadas de los componentes principales corresponde a la similitud entre los RAC. El resultado de este análisis fue una gráfica de dispersión de los diferentes

residuos que, relacionada con la gráfica de pesos de las variables, permitió identificar el tipo de aprovechamiento energético que favorece a cada residuo. Statgraphics Centurion XV[®] fue usado como *software* estadístico en el tratamiento de los datos.

7. RESULTADOS Y ANÁLISIS

7.1 DEMANDA ENERGÉTICA Y ZONAS DE ESTUDIO

En la Tabla 2 se muestra el resultado de la demanda energética calculada para los 17 departamentos que pertenecen a las ZNI de Colombia.

Tabla 2. Demanda energética de los departamentos ZNI de Colombia.

Departamentos ZNI	Usuarios ZNI	Demanda Energética (GWh)
Amazonas	11.606	12,81
Antioquia	4.999	5,52
Bolívar	417	0,46
Caquetá	15.905	17,56
Casanare	3.176	3,51
Cauca	10.821	11,95
Chocó	31.970	35,30
Guainía	6.001	6,63
Guaviare	6.856	7,57
La Guajira	536	0,59
Meta	12.526	13,83
Nariño	23.763	26,23
Putumayo	16.429	18,14
San Andrés y Providencia	19.309	21,32
Valle	2.490	2,75
Vaupés	4.786	5,28
Vichada	9.075	10,02

Los seis departamentos que presentaron la mayor demanda energética, mencionados de mayor a menor, fueron: Chocó, Nariño, San Andrés y Providencia, Putumayo, Caquetá y Meta. Para este trabajo se seleccionaron los departamentos de Chocó, Putumayo, Caquetá y Meta. Se descartó a Nariño dado que, a pesar de que tiene una de las mayores demandas, el gobierno nacional ya tiene implementado un Plan de Energización Rural Sostenible (PERS) en todo el departamento.

Así mismo, no se tuvo en cuenta a San Andrés ya que su razón de interconexión se debe a su ubicación geográfica y este cuenta con un índice de cobertura de energía eléctrica del 100% suministrada en su mayoría mediante sistemas diésel (UPME, 2013), adicional a esto, San Andrés no cuenta con áreas cultivadas significativas.

En la Figura 4 se indica el mapa de Colombia con los departamentos de estudio en color verde claro y los municipios pertenecientes a las ZNI de estos departamentos, en color verde oscuro. En el Anexo B se encuentran estos municipios con el porcentaje de participación en las ZNI.

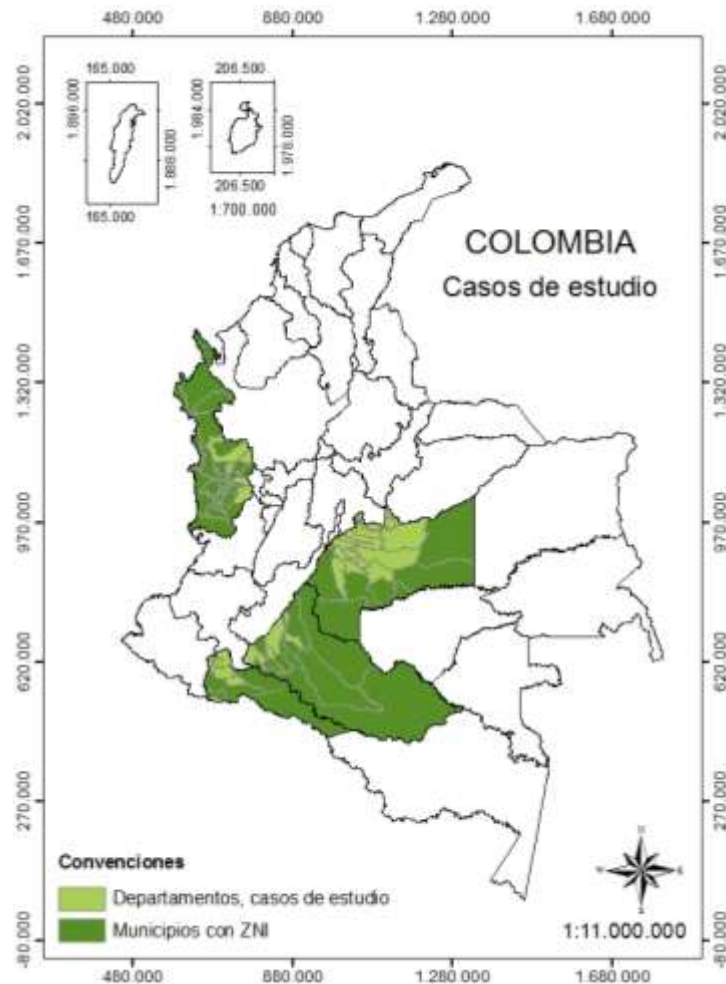


Figura 4. Mapa de Colombia con los departamentos caso de estudio.

7.2 BIOMASA RESIDUAL AGRÍCOLA SELECCIONADA

En las figuras 5, 6, 7 y 8 se muestran los ocho cultivos más representativos en términos de área cosechada en Caquetá, Chocó, Meta y Putumayo, respectivamente.

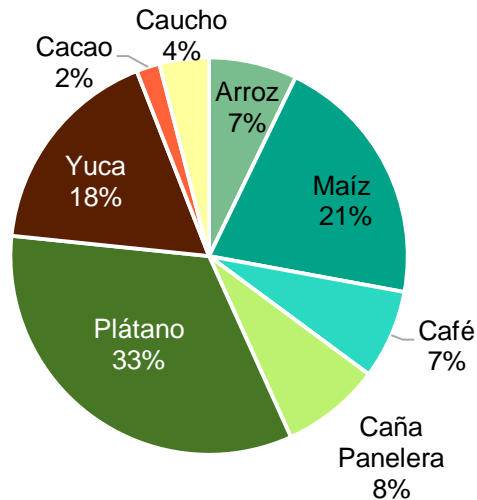


Figura 5. Área (ha) de los principales cultivos en las ZNI de Caquetá.

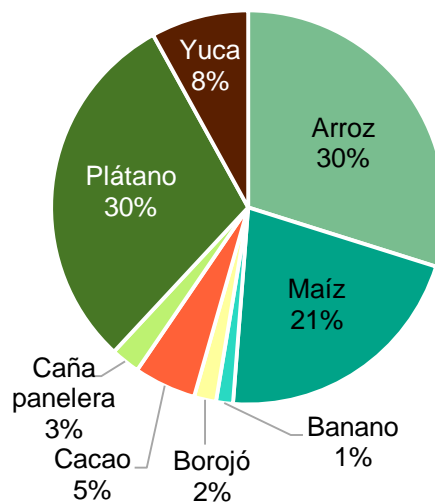


Figura 6. Área (ha) de los principales cultivos en las ZNI de Chocó.

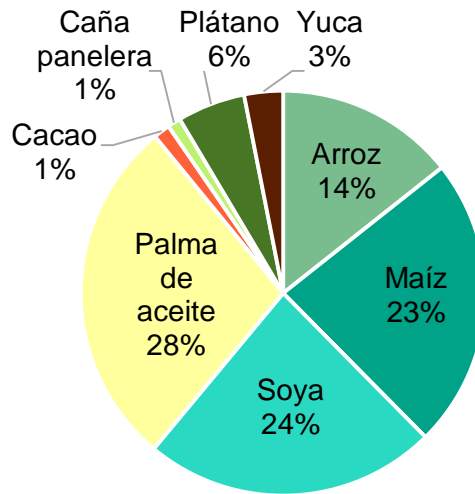


Figura 7. Área (ha) de los principales cultivos en las ZNI de Meta.

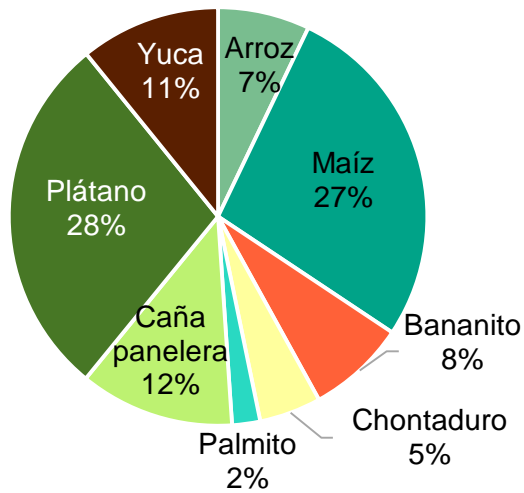


Figura 8. Área (ha) de los principales cultivos en las ZNI de Putumayo.

Para el departamento de Caquetá se seleccionaron los cuatro cultivos con mayor área cosechada: plátano, maíz, yuca y caña panelera. Para Chocó se escogieron los cultivos de plátano, maíz, banano y borjój. En el caso del Meta, se escogieron los cultivos de maíz y arroz. Aunque el cultivo de palma de aceite presentaba la mayor área de cultivo se prescindió de este por ser un cultivo que, aunque genera

hojas como residuo agrícola de cosecha (RAC) estas son dejadas en el suelo en su totalidad como abono del mismo. Por último, para el departamento de Putumayo se seleccionaron los cultivos de plátano, caña panelera y palmito.

En la Tabla 3 se indican el área cosechada y la producción de los cultivos seleccionados, a partir de datos del 2012, en los cuatro departamentos de estudio.

Tabla 3. Cultivos y residuos seleccionados por departamento.

Depto.	Cultivo	Residuo agrícola de cosecha (RAC)	Área Cosechada (ha) ^a	Producción (t) ^b
Caquetá	Plátano	Hojas (HP)	10.320	61.741
		Vástago (VP)		
	Maíz	Rastrojo (RM)	6.403	6.974
	Yuca	Rastrojo (RY)	5.389	40.243
	Caña panelera	Hojas y cogollos (HC)	2.504	12.044
Chocó	Plátano	Hojas	15.330	128.036
		Vástago		
	Maíz	Rastrojo	10.904	13.378
	Banano	Hojas (HB)	707	5.008
	Vástago (VB)			
	Borojó	Podas (PB)	926	2.233
Meta	Maíz	Rastrojo	9.759	34.745
	Arroz	Tamo (TA)	6.021	28.859
Putumayo	Plátano	Hojas	4.145	33.210
		Vástago		
	Caña panelera	Hojas y cogollos	1.755	5.178
	Palmito	Hojas (HPm)	318	443
Tallo (TPm)				

Fuente: a, b: Datos tomados de AGRONET. Base agrícola EVA 2012. (MINAGRICULTURA, 2013).

En total se seleccionaron 18 residuos agrícolas de cosecha, de 6 cultivos permanentes (caña panelera, plátano, yuca, banano, borojón y palmito) y 2 cultivos transitorios (maíz y arroz). Los tres cultivos que presentaron mayor área cosechada fueron el plátano en Chocó y Caquetá, y el maíz en Chocó, con áreas de 15.330, 10.320 y 10.904 (ha), respectivamente.

7.3 MUESTREO DE LOS RESIDUOS AGRÍCOLAS DE COSECHA (RAC)

En la Tabla 4 se muestran los sitios seleccionados para la toma de muestras de la biomasa residual agrícola, con los cultivos y residuos respectivos para cada departamento.

Tabla 4. Localización de los sitios de muestreo en las zonas de estudio.

Departamento	Localización		Cultivo	RAC
	Municipio	Vereda		
Caquetá	Cartagena del Chairá	Tigrera	Plátano	Hojas y vástago
			Maíz	Rastrojo
			Yuca	Rastrojo
			Caña panelera	Hojas y cogollos
Chocó	Alto Baudó	Pie de Pato	Plátano	Hojas y vástago
			Maíz	Rastrojo
			Banano	Hojas y vástago
			Borojón*	Podas
Meta	Puerto Concordia	El Paraíso	Arroz	Tamo
		Caño Marimba	Maíz	Rastrojo
Putumayo	Orito	El Yarumo	Plátano	Hojas y vástago
		Silvania	Caña panelera	Hojas y cogollos
		El Paraíso	Palmito*	Hojas y tallo

*Cultivos considerados como autóctonos.

7.4 CARACTERIZACIÓN FÍSICOQUÍMICA DE LOS RAC

En la Tabla 5 se muestran los resultados del análisis básico, el análisis elemental, el análisis próximo, el análisis estructural y el contenido energético de los residuos agrícolas de cosecha muestreados en cada departamento.

7.4.1 Análisis básico

En la figura 9 se presenta el porcentaje de humedad de todos los RAC de estudio. El 87,5% de los datos se encuentra en el intervalo de 70,6% – 95,8%, lo que indica que la mayoría de RAC presentan altos contenidos de humedad a excepción de las podas de borjój en Chocó y el rastrojo de maíz en el Meta con valores de 43,56% y 48,69%, respectivamente. Se puede observar que el vástago de banano en Chocó y el vástago de plátano de Putumayo, Caquetá y Chocó son los residuos que presentaron el mayor porcentaje de humedad con valores de 95,83%, 95,6%, 94,37% y 93,74%, respectivamente. Lo anterior refleja que la masa de los principales RAC que se observan en la figura 9 está ampliamente influenciada por la humedad contenida en estos residuos.

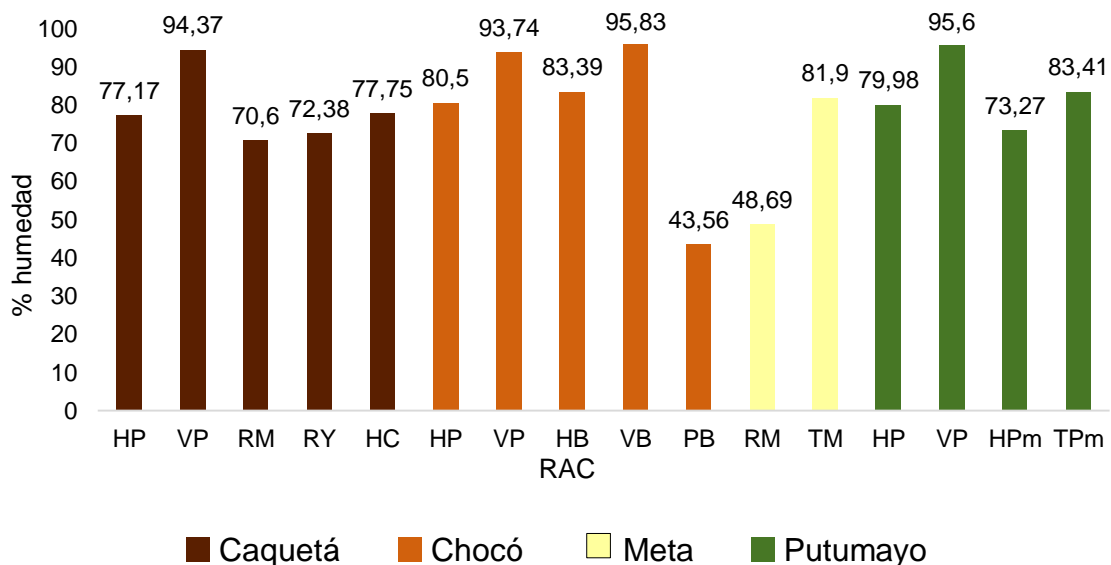


Figura 9. Porcentaje de humedad en los RAC.

Tabla 5. Resultados de los análisis fisicoquímicos de la biomasa residual agrícola.

Residuo agrícola de cosecha	Ab.	A. básico [%p seco]		Análisis elemental [% peso seco]					Análisis próximo [% peso seco]			Análisis estructural [% peso seco]			Contenido Energético
		Hu.	ST	C	H	O	N	S	SV	CF	Cenizas	Celu.	Hemi.	Lign.	PCI [kJ/kg]
Caquetá															
Hojas plátano	HP	77,17	21,04	35,74	4,67	35,42	2,24	0,14	71,32	16,54	12,14	22,75	26,96	13,37	12.430,61
Vástago plátano	VP	94,37	5,5	36,46	4,76	36,13	0,48	0,15	73,51	14,81	11,68	26,08	24,43	3,46	12.677,63
Rastrojo maíz	RM	70,6	28,21	40,86	5,45	41,93	0,88	0,11	78,77	17,11	4,12	14,61	33,54	10,12	14.122,08
Rastrojo yuca	RY	72,38	26,99	38,74	5,16	39,76	1,44	0,19	77,62	19,14	3,24	34,87	32,86	18,11	13.389,39
Hojas y cogollos de caña	HC	77,75	20,62	36,91	4,82	36,58	1,12	0,25	75,29	19,94	4,77	16,03	34,76	12,35	12.845,10
Chocó															
Hojas plátano	HP	80,5	19,5	34,8	4,57	34,79	3,28	0,47	74,45	13,61	11,94	----	----	----	12.120,79
Vástago plátano	VP	93,74	6,23	31,39	4,12	31,38	0,48	0,28	75,43	10,44	14,13	----	----	----	10.914,99
Hojas banano	HB	83,39	16,61	32,76	4,35	33,33	2	0,36	----	----	----	----	----	----	11.371,35
Vástago banano	VB	95,83	4,17	33,62	4,46	34,2	0,64	0,31	74,13	12,7	13,17	----	----	----	11.660,24
Podas borojó	PB	43,56	56,44	36,69	4,82	36,68	0,72	0,21	74,90	20,36	4,74	32,23	15,7	24,25	12.748,81
Meta															
Rastrojo maíz	RM	48,69	51,31	39,9	5,24	39,89	0,8	0,15	73,72	22,17	4,11	47,39	37,81	12,7	13.854,12
Tamo arroz	TM	81,9	18,1	37,13	4,88	37,12	2,16	0,2	67,16	16,44	16,4	----	----	----	12.903,72
Putumayo															
Hojas plátano	HP	79,98	18,84	30,4	4,12	32,03	1,92	0,16	----	----	----	----	----	----	10.467,47
Vástago plátano	VP	95,6	4,23	31,31	4,11	31,31	1,04	0,14	----	----	----	----	----	----	10.871,12
Hojas palmito	HPm	73,27	26,11	34,18	4,32	31,88	1,12	0,16	----	----	----	45,28	13,9	11,65	12.014,99
Tallo palmito	TPm	83,41	16,24	35,83	4,42	31,99	0,64	0,17	----	----	----	26,21	20,81	15,5	12.680,32

Por otra parte, este porcentaje de humedad tan alto es una desventaja frente al posible uso de la biomasa en procesos de transformación termoquímica, dado que este está inversamente correlacionado con el poder calorífico (Zhang *et al.*, 2010; Vassilev *et al.*, 2010). Los procesos termoquímicos generalmente se emplean para materias primas con contenidos de humedad $\leq 50\%$ (Cutz *et al.*, 2016). Con base en lo anterior, se puede inferir que las podas de borjón en Chocó (43,56%) y el rastrojo de maíz en el Meta (48,69%) son las biomásas que tienen más posibilidad de ser aprovechadas mediante esta tecnología.

El contenido de sólidos totales (ST) tuvo su mínimo valor para el vástago de banana en Chocó (4,17%) y su máximo valor para las podas de borjón en Chocó (56,44%) con un valor promedio de 21,26%. Lo anterior permite considerar que los RAC analizados presentaron un alto valor de sólidos totales, y para uso en digestión anaerobia en estado sólido (ST > 15%) tendría ventajas como: menores volúmenes en el reactor, menos agua para la dilución, menor requerimiento de mezcla, no hay sustratos flotantes, y en general, menor consumo de energía para la operación (Sawatdeenarunat *et al.*, 2015).

7.4.2 Análisis elemental

El análisis elemental está conformado por el contenido de carbono, hidrógeno, oxígeno, nitrógeno y azufre, medidos en porcentaje en peso en base seca. En la Tabla 5 se observa que el contenido de carbono para la biomasa residual analizada se encontró en el intervalo de 30,40% - 40,86%, con un valor promedio de 35,42%. El rastrojo de maíz de Caquetá presentó el valor más alto, mientras que el valor más bajo correspondió a las hojas de plátano de Putumayo. Generalmente el contenido de carbono de la biomasa está en el rango de 42% - 71% (Vargas *et al.*, 2012); basándose en este intervalo, los residuos analizados presentaron contenidos de carbono bajos, lo que influye negativamente en el poder calorífico superior de la biomasa y consecuentemente en un proceso termoquímico (Vargas *et al.*, 2012; Chadwick *et al.*, 2014). Sin embargo, un bajo contenido de carbono tiene

un beneficio significativo para la reducción de emisiones de CO₂ durante la conversión de la biomasa (Vassilev *et al.*, 2015).

El contenido de hidrógeno fue muy similar en todos los RAC estudiados, con un valor promedio de 4,64%, donde, el vástago de plátano de Putumayo presentó el valor mínimo (4,11%) y el rastrojo de maíz de Caquetá el máximo valor (5,45%). Estos resultados indican que los porcentajes obtenidos son bajos en comparación al rango de 3% - 11%, en el que generalmente se halla en la biomasa. Lo anterior es una desventaja para el uso de la biomasa en procesos termoquímicos, debido a que el bajo contenido de hidrógeno se traduce en una menor volatilidad, baja reactividad y bajo poder calorífico (Vassilev *et al.*, 2015).

El contenido de oxígeno tuvo un valor promedio de 35,28%, lo que refleja una tendencia al límite superior del intervalo 16% – 49%, en el que generalmente se encuentra en la biomasa. Lo anterior infiere un alto contenido de oxígeno, que a su vez es una desventaja en un proceso termoquímico, ya que disminuye el poder calorífico de la biomasa. Debido a los altos niveles de oxígeno e hidrógeno en la celulosa y hemicelulosa, la biomasa presenta bajos contenidos de coque en comparación con los combustibles fósiles (Chadwick *et al.*, 2014).

Por su parte, la cantidad porcentual de nitrógeno se encontró entre 0,48% para el vástago de plátano de Caquetá y Chocó, y 3,28% para las hojas de plátano del Chocó, con un valor promedio de 1,31%, presentando una tendencia hacia el valor mínimo en el rango en que generalmente se encuentra en la biomasa (0,1% y 12%). Lo anterior favorece el uso de un proceso termoquímico para su procesamiento ya que implicaría bajas emisiones de gases contaminantes NO_x (Telmo *et al.*, 2011; Pécora *et al.*, 2014), sin embargo, no sería tan favorable para un proceso bioquímico dado que el nitrógeno es una de las fuentes principales de alimento de las bacterias metanogénicas (MINENERGÍA, 2011).

Así mismo, las concentraciones de azufre estuvieron en el rango de 0,11% a 0,47%, con un promedio de 0,22%, reflejando valores bajos en comparación a los

que generalmente puede presentar la biomasa (0.01% – 2.3%) (Vassilev *et al.*, 2010; Vargas *et al.*, 2012; Pécora *et al.*, 2014). El rastrojo de maíz de Caquetá registró la mínima concentración de azufre (0,11%). Estos bajos porcentajes de azufre garantizan una ventaja para el uso de un proceso termoquímico, ya que involucra bajas emisiones de gases contaminantes (SO_x) y reducción de corrosión en los equipos (Telmo *et al.*, 2011; Pécora *et al.*, 2014).

7.4.3 Análisis próximo

El análisis próximo está conformado por el contenido de sólidos volátiles, carbono fijo y cenizas, determinados en porcentaje en peso en base seca. Este análisis fue desarrollado para todos los RAC del estudio, a excepción de los RAC de Putumayo y las hojas de banano de Chocó.

La concentración de sólidos volátiles (SV) de los RAC analizados estuvo en el intervalo de 67,16% para el tamo de arroz en el Meta y 78,77% para el rastrojo de maíz en Caquetá, con un valor promedio de 74,21%. Los valores de SV para la biomasa generalmente se encuentran entre 48% y 86% (Vargas *et al.*, 2012; Pang *et al.*, 2014), lo que permite inferir que la biomasa analizada contiene altos porcentajes de sólidos volátiles. Este alto contenido de SV es una de las más grandes ventajas que presenta la biomasa porque permite: ignición, desvolatilización y quema más fácil y rápida; mayor producción de gas combustible y vapores inorgánicos; combustión mejorada; formación de *biochar* con alta área superficial específica, entre otros (Vassilev *et al.*, 2015). Así mismo, un alto contenido de SV permite una buena producción de gas metano en el proceso de digestión anaerobia (MINENERGÍA, 2011).

El contenido de carbono fijo (CF) en la biomasa analizada registró un promedio de 16,66%, en un intervalo de 10,44% para el vástago de plátano en Chocó y 22,17% para el rastrojo de maíz en Meta. Generalmente, el contenido de carbono fijo en la biomasa está en el rango de 6,5% - 35,3% (Vassilev *et al.*, 2015). En este caso, se

puede observar que los contenidos de CF obtenidos se encuentran en un término medio y no constituye una alta desventaja para el uso de los RAC en procesos termoquímicos, dado que el contenido de carbono fijo está directamente relacionado con el poder calorífico de la biomasa.

El porcentaje de cenizas en los RAC analizados se encontró en el intervalo de 3,24% - 16,4%, con un valor promedio de 9,13%. El porcentaje de cenizas en la biomasa generalmente se encuentra entre 1% y 40% (Vargas *et al.*, 2012), lo que permite inferir que la biomasa residual analizada presenta bajos contenidos de cenizas. Lo anterior es una ventaja en procesos como la combustión, dado que se estarían evitando serios problemas para las plantas de energía debido a la formación de escoria y corrosión (Monti *et al.*, 2008), por otra parte, se favorecería el poder calorífico, el cual tiene una correlación negativa respecto a la cantidad de cenizas (Chadwick *et al.*, 2014).

7.4.4 Análisis estructural

El análisis estructural fue desarrollado para todos los RAC en Caquetá, para las podas de borojó en Chocó, para el rastrojo de maíz en Meta y para las hojas y tallos de palmito en Putumayo. La cantidad porcentual de celulosa tuvo un valor promedio de 29,50% en el rango de 14,61% a 47,39%, con el máximo valor para rastrojo de maíz en Meta y el mínimo para rastrojo de maíz en Caquetá. Según Akhtar & Saidina (2012), el contenido de celulosa en la biomasa generalmente se encuentra en el rango de 25% a 50% en peso. Basados en lo anterior, y teniendo en cuenta el promedio obtenido para los RAC analizados, se puede deducir que la mayoría no presentan altos contenidos de celulosa, lo que sería una desventaja para el uso de estos residuos en procesos bioquímicos. Por otra parte, presentaría baja velocidad en el proceso de pirolisis (Gani & Naruse, 2007; Worasuwanarak *et al.*, 2007) y una baja contribución al rendimiento de la producción de bio-oil (Akhtar & Saidina, 2012).

Por su parte, la hemicelulosa se encontró en un valor promedio de 26,75%, donde el mínimo valor fue encontrado en las hojas de palmito en Putumayo (13,9%) y el máximo en el rastrojo de maíz de Meta (37,81%). Los porcentajes se encontraron dentro del rango en el que generalmente se encuentra la hemicelulosa en la biomasa (15% – 40%) (Kan *et al.*, 2016).

El contenido de lignina en la biomasa habitualmente se encuentra en el intervalo de 10% a 40% (Kan *et al.*, 2016). Para este trabajo, el mínimo valor fue encontrado en el vástago de plátano en Caquetá (3,46%) y el máximo en las podas de borjón en Chocó (24,25%), con un valor promedio de 13,50%. Por el bajo contenido de lignina se puede inferir que, los RAC analizados presentan una ventaja frente a su aprovechamiento mediante procesos termoquímicos y bioquímicos, dado que la resistencia a la descomposición (térmica o biológica) sería menor (Pang *et al.*, 2014). Por el contrario, para su uso en pirólisis se produciría una menor proporción de carbón sólido o *biochar* (Akhtar & Saidina, 2012). Así mismo, este bajo contenido de lignina garantiza emisiones con bajas concentraciones de CH₄ (Pasangulapati *et al.*, 2012).

7.4.5 Contenido energético

En la Figura 10 se observan los resultados del poder calorífico inferior para los RAC de los cuatro departamentos. El mínimo valor fue obtenido para las hojas de plátano en Putumayo (10.467,47 kJ/kg) y el máximo para el rastrojo de maíz en Caquetá (14.122,08 kJ/kg) con un valor promedio de 12.317,05 kJ/kg.

El poder calorífico inferior para residuos agrícolas se encuentra en la literatura en un rango aproximado de 5.300 kJ/kg – 19.700 kJ/kg (Koopmans & Koppejan, 1997; Iye & Bilsborrow, 2013; González–Salazar *et al.*, 2014; Roberts *et al.*, 2015). Con base en lo anterior, se puede inferir que el PCI de las muestras analizadas presentó un valor promedio del rango en que generalmente se encuentran los residuos agrícolas. Esto no es una gran ventaja si se desea implementar un proceso

termoquímico en el aprovechamiento de los RAC de estudio. En general, la biomasa no es un combustible ideal. Sobre la misma base en peso, usualmente tiene un poder calorífico más bajo que el carbón, esto como consecuencia de su bajo contenido de carbono e hidrógeno y alto contenido de oxígeno (Vargas-Moreno *et al.*, 2012).

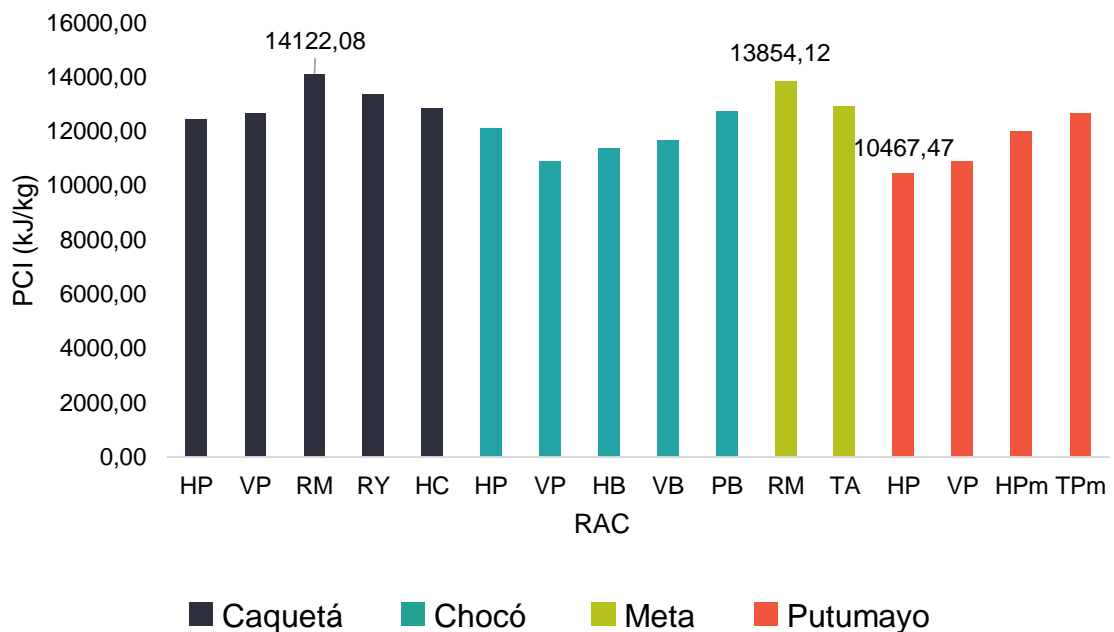


Figura 10. Poder Calorífico Inferior de los RAC.

7.5 POTENCIAL ENERGÉTICO DE LOS RAC

El potencial energético se calculó con base en la Ecuación 6 a partir de los datos de área y producción registrados en la Tabla 3, la fracción de residuo seco a partir de la humedad (Tabla 5), el poder calorífico inferior (Tabla 5) y la relación residuo a producto cuyos resultados se presentan a continuación.

7.5.1 Relación residuo a producto (RRP)

La relación residuo a producto (RRP) es un componente importante en el cálculo de la masa de residuo, ya que este puede variar significativamente de país a país, incluso de región a región. En la Tabla 6 se muestran los resultados del RRP ($t_{\text{residuo}}/t_{\text{producto}}$) calculado para los residuos de este trabajo y su comparación con otros estudios.

Tabla 6. RRP de los RAC del presente trabajo y de otros estudios.

Cultivo	RAC	RRP ($t_{\text{residuo}}/t_{\text{producto principal}}$)									
		Caquetá	Chocó	Meta	Putumayo	A	B	C	D	E	F
Plátano	Hojas	0,25	0,35	----	0,33	----	----	----	0,50	----	----
	Vástago	2,76	3,91	----	4,16	5	----	----	----	----	2
Maíz	Rastrojo	5,67	2,32	0,56	----	0,93	2	2	1,59	1,60	2
Yuca	Rastrojo	0,75	----	----	----	----	0,06	----	0,06	----	0,4
Caña panelera	Hojas y cogollos	0,48	----	----	0,18	3,75	----	0,05	----	0,13	0,3
Banano	Hojas	----	0,35	----	----	----	----	----	----	3	----
	Vástago	----	5,6	----	----	----	----	----	----	----	2
Borojó	Podas	----	0,12	----	----	----	----	----	----	----	----
Arroz	Tamo	----	----	0,25	----	2,35	1,75	1,5	1,66	----	0,45
Palmito	Hojas	----	----	----	5,07	----	----	----	----	----	----
	Tallo	----	----	----	8,66	----	----	----	----	----	----

Donde A: Escalante *et al.*, 2011; B: Iye & Bilsborrow, 2013; C: Hiloidhari *et al.*, 2014; D: Kemausuor *et al.*, 2014; E: Cardoen *et al.*, 2015 y F: Cutz *et al.*, 2016.

Se observa que el RRP de las hojas de plátano en Caquetá (0,25), Chocó (0,35) y Putumayo (0,33) se encuentran en el mismo orden de magnitud en comparación al valor reportado por Kemausuor *et al.* (2014). Así mismo, los valores obtenidos para el vástago de plátano en Chocó y Putumayo, 3,91 y 4,16, respectivamente, re-

sultaron similares al reportado por Escalante *et al.* (2011) con un valor de 5. Por otra parte, el rastrojo de maíz en el Chocó presentó un RRP de 2,32 bastante cercano a los valores reportados en los estudios B al F (1,59; 1,60; 2). De la misma manera, el RRP del rastrojo de yuca (0,75) en Caquetá resultó muy cercano a los reportados por los estudios B (0,06), D (0,06) y F (0,4) para este residuo. Basado en lo anterior, se observa que los valores de RRP de las hojas de plátano, vástago de plátano de Chocó y Putumayo, el rastrojo de maíz del Chocó y el rastrojo de yuca de Caquetá, en estas comparaciones, son muy similares a los contrastados con los otros autores internacionales. Sin embargo, no sucede lo mismo para los valores de RRP de los otros residuos.

Las hojas y cogollos de caña panelera en Caquetá y Putumayo presentaron valores de 0,48 y 0,18, respectivamente, bastante alejados al reportado por Escalante *et al.*, (2011) que fue de 3,75. A pesar de que son valores calculados en el mismo país la diferencia depende de varios parámetros como características del suelo, contenido de humedad al momento del muestreo, rendimiento del cultivo, la logística de recolección, entre otros (Kemausuor *et al.*, 2014; Angelis-Dimakis *et al.*, 2011; Iye & Bilsborrow, 2013). Algo similar sucede con el RRP del tamo de arroz en el Meta que tiene un valor de 0,25, alejado del factor 2,35 presentado por Escalante *et al.*, (2011).

No se encontraron datos en la literatura para el RRP de podas de Borojó, ni hojas y tallos de palmito para realizar el análisis comparativo.

Por lo anterior, se considera de gran importancia que se calcule la relación residuo a producto correspondiente al residuo de estudio para que los resultados sean representativos de cada región, dado que esta relación varía significativamente de país a país, incluso de región a región, como se observó en las anteriores comparaciones.

7.5.2 Masa y potencial energético de los RAC

Tabla 7. Masa y PE de los RAC de los cultivos en cada departamento.

Depto.	Cultivo	RAC	Área (Ha) ^a	Prod. (t/año) ^b	Masa de RAC (kt/año)	PE (TJ/año)
Caquetá	Plátano	Hojas (HP)	9.665	60.884	15,22	21,60
		Vástago (VP)			168,04	59,97
	Maíz	Rastrojo (RM)	5.871	6.936	39,33	81,64
	Yuca	Rastrojo (RY)	6.095	45.203	33,90	62,69
	Caña panelera	Hojas y cogollos (HC)	2.122	11.295	5,42	7,75
Chocó	Plátano	Hojas	23.498	244.579	85,60	101,16
		Vástago			956,30	326,71
	Maíz	Rastrojo	12.914	16.585	38,48	79,88
	Banano	Hojas (HB)	2.352	11.122	3,89	3,68
		Vástago (VB)			62,28	15,14
Borojó	Podas (PB)	914	3.623	0,43	1,56	
Meta	Maíz	Rastrojo	17.295	88.155	49,37	175,46
	Arroz	Tamo (TA)	8.676	43.105	10,78	12,58
Putumayo	Plátano	Hojas	4.410	32.611	10,80	11,31
		Vástago			135,69	32,45
	Caña panelera	Hojas y cogollos	2.053	7.383	1,32	1,88
	Palmito	Hojas (HPm)	204	321	1,63	2,61
		Tallo (TPm)			2,78	2,92
TOTAL					1.621,26	1.001,01

Fuente: a, b: Datos tomados de AGRONET. Base agrícola EVA 2007 – 2015. (MINAGRICULTURA, 2016).

Los resultados mostrados en la Tabla 7 indican la masa y el potencial energético de los RAC de los cultivos en cada departamento, calculados con la ecuación 4 y 3, respectivamente.

El vástago de plátano (VP) de Chocó y Caquetá son los RAC que presentaron la mayor cantidad en toneladas por año de todos los residuos, con valores de 956,30 kt/año y 168,04 kt/año, respectivamente. Seguidos del vástago de plátano de Putumayo y las hojas de plátano (HP) de Chocó, con valores de 135,69 kt/año y 85,60 kt/año, respectivamente, como se observa en la Figura 11.

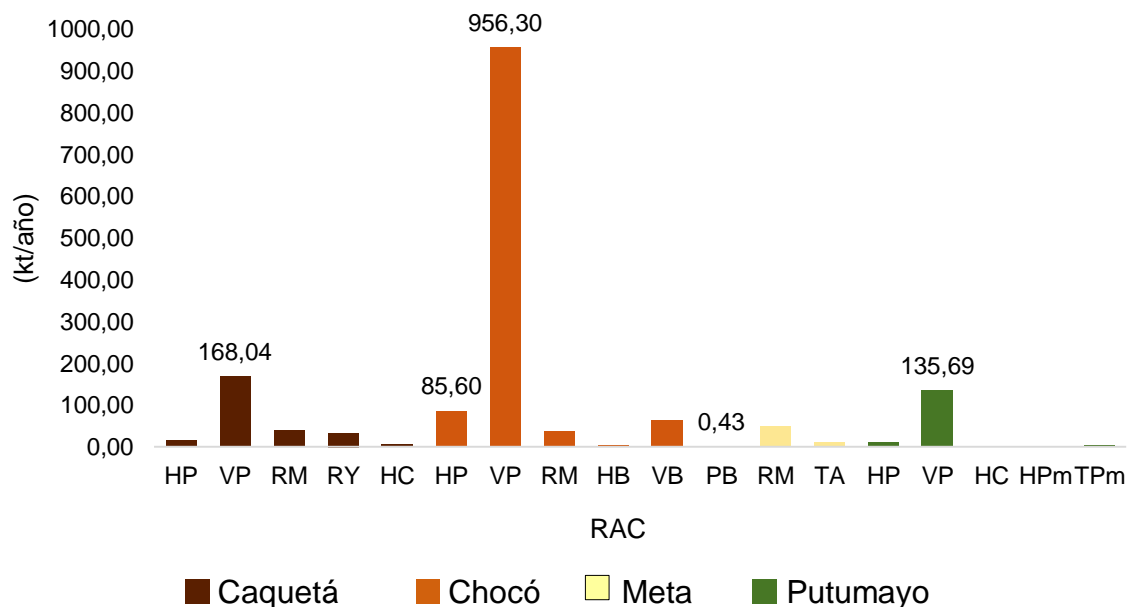


Figura 11. Masa de residuos agrícolas de cosecha generada en cada departamento.

Lo anterior refleja que el plátano es el principal cultivo en tres de los cuatro departamentos en términos de masa de residuo disponible. Por otra parte, las podas de Borojó (PB) solo ofrecieron 0,43 kt/año, siendo el residuo de menor masa disponible en este estudio. El total de RAC que ofrecieron todos los cultivos en los cuatro departamentos fue de 1.621,26 kt/año.

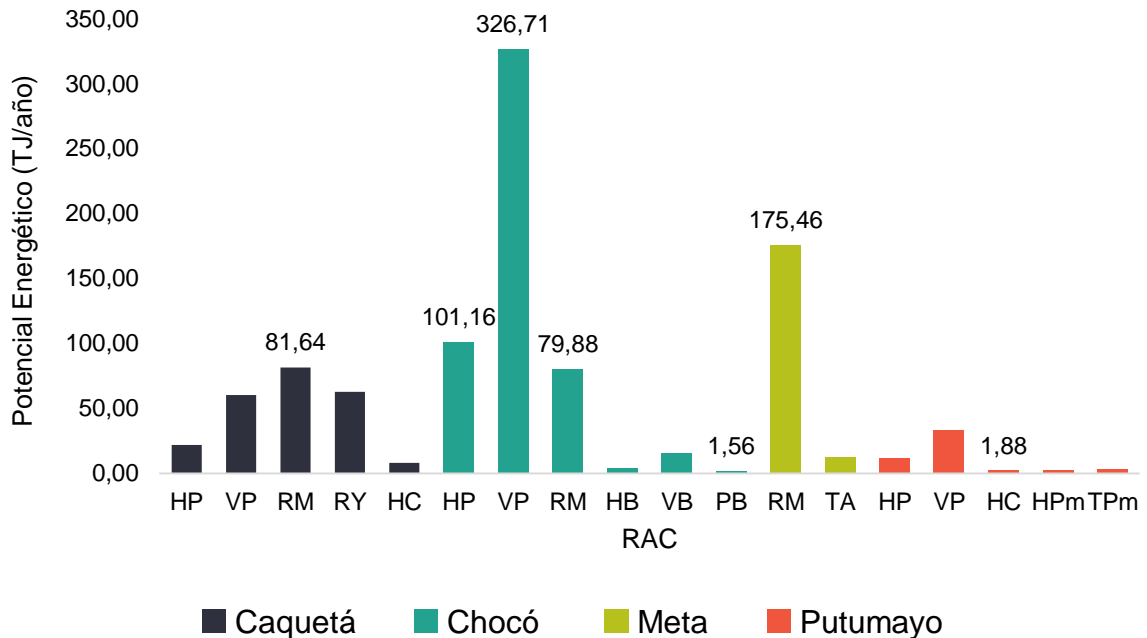


Figura 12. Potencial energético de los RAC en cada departamento.

En la Figura 12 se observa el potencial energético de los RAC seleccionados en cada departamento. El vástago de plátano del Chocó presentó un potencial energético de 326,71 TJ/año, siendo el mayor de los resultados obtenidos, seguido del rastrojo de maíz del Meta, las hojas de plátano del Chocó, y el rastrojo de maíz de Caquetá y de Chocó con valores de 175,46, 101,16, 81,64 y 79,88 TJ/año, respectivamente. Aunque el rastrojo de maíz no se presenta como un residuo representativo en términos de toneladas por año, este indicó uno de los valores más altos de potencial energético, lo que refleja su bajo contenido de humedad en comparación con los otros residuos. Por su parte, las podas de borjój de Chocó (1,56 TJ/año) y las hojas y cogollos de caña panelera (1,88 TJ/año) de Putumayo presentaron los valores de potencial energético más bajos.

En total se dispone de 1.001,01 TJ/año de potencial energético en los cuatro departamentos, siendo el Chocó el departamento que más potencial aportó con 528,13 TJ/año. Este potencial energético en los cuatro departamentos equivale a 83,42 GWh/año teniendo en cuenta una eficiencia de conversión de energía del

30%, considerando un aprovechamiento energético de la biomasa mediante combustión o digestión anaerobia (McKendry, 2002).

Como se observa en la Tabla 8, las 261,91 kt/año de RAC generados en Caquetá pueden producir 19,47 GWh/año si la eficiencia de conversión es del 30%. Lo que indica que el uso de los residuos, en este departamento, lograría un abastecimiento total de la demanda energética (17,56 GWh/año). De la misma manera sucede en los departamentos de Chocó y Meta, se lograría un abastecimiento total de la demanda energética si se usaran los RAC para producir energía. Por el contrario, en el departamento del Putumayo solo se podría abastecer 24% de la demanda de energía eléctrica de las ZNI del departamento.

Tabla 8. Energía eléctrica (EE) que podrían generar los RAC en cada departamento.

Departamentos ZNI	Demanda Energética (GWh/año)	Masa de RAC (kt/año)	EE que podrían generar los RAC, eficiencia 30% (GWh/año)
Caquetá	17,56	261,91	19,47
Chocó	35,30	1146,99	44,01
Meta	13,83	60,14	15,67
Putumayo	18,14	152,21	4,27

7.5.3 Representación cartográfica del potencial energético

En las Figuras 13 a 16 se presentan los mapas del potencial energético anual en los municipios pertenecientes a las ZNI de Caquetá, Chocó, Meta y Putumayo, respectivamente. El cuadro de convenciones localizado en la parte inferior informa sobre el potencial energético representado en la gama degradada del color verde, siendo el verde oscuro el color que corresponde al mayor potencial.

Figura 13. Mapa del potencial energético en las ZNI de Caquetá.

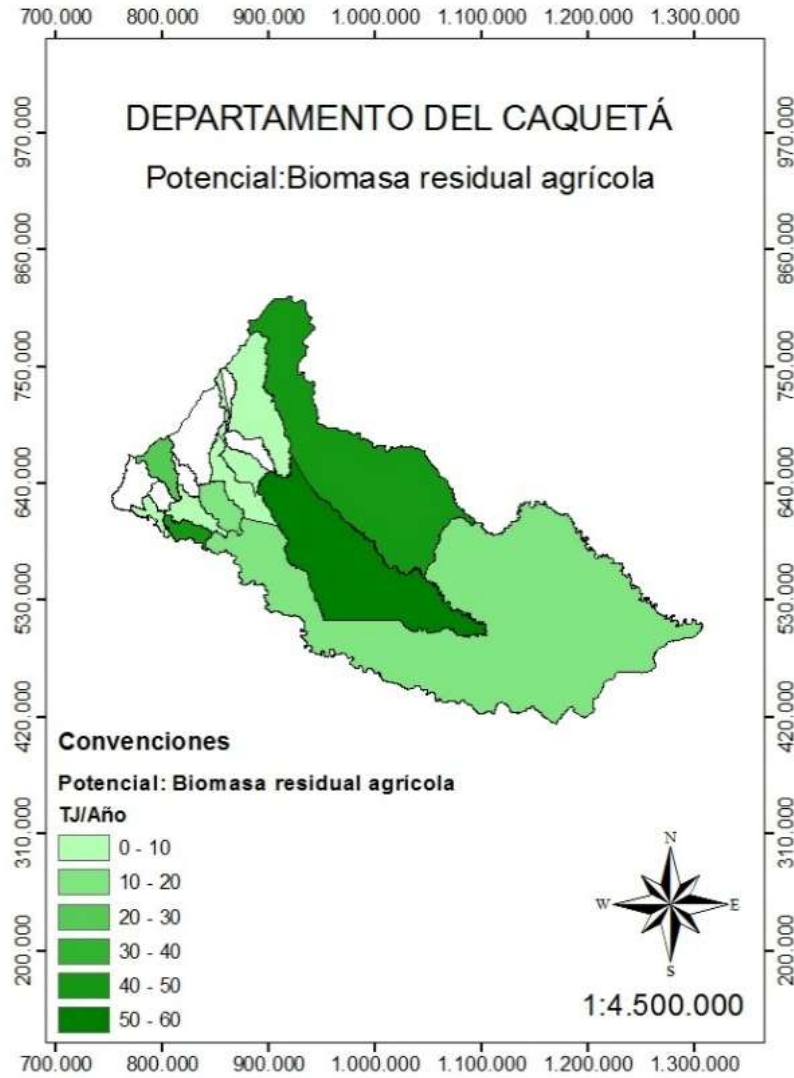


Figura 14. Mapa del potencial energético en las ZNI de Chocó.

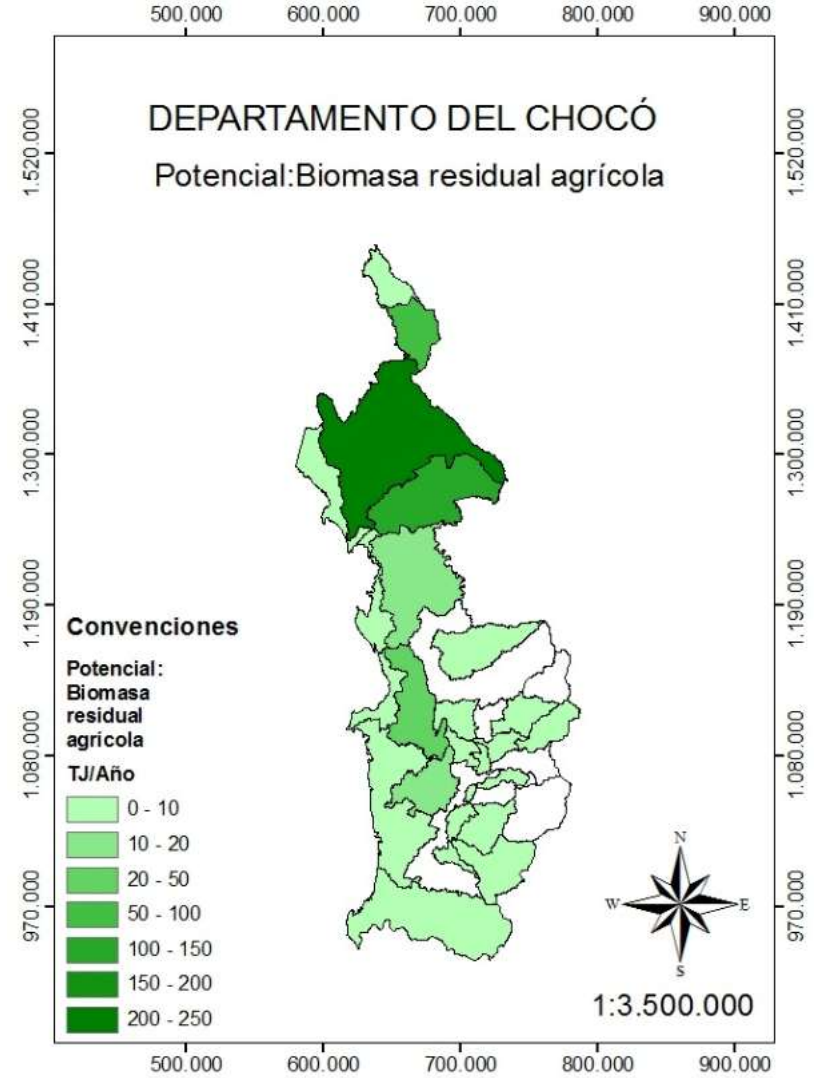


Figura 15. Mapa del potencial energético en las ZNI de Meta.

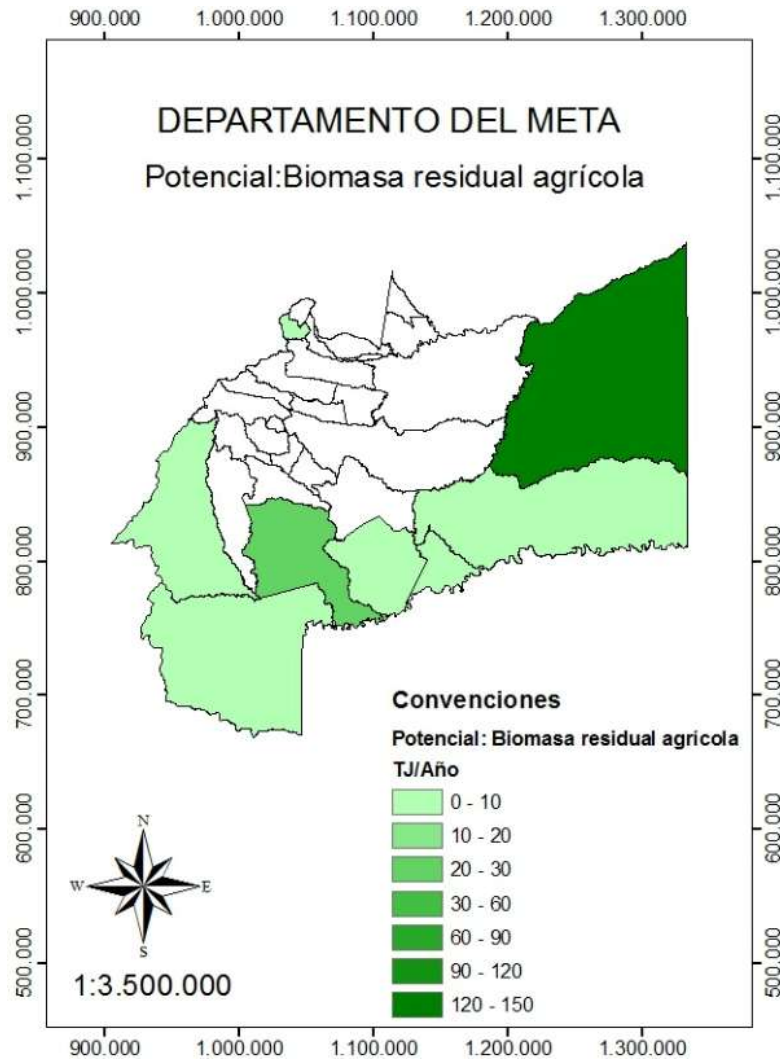
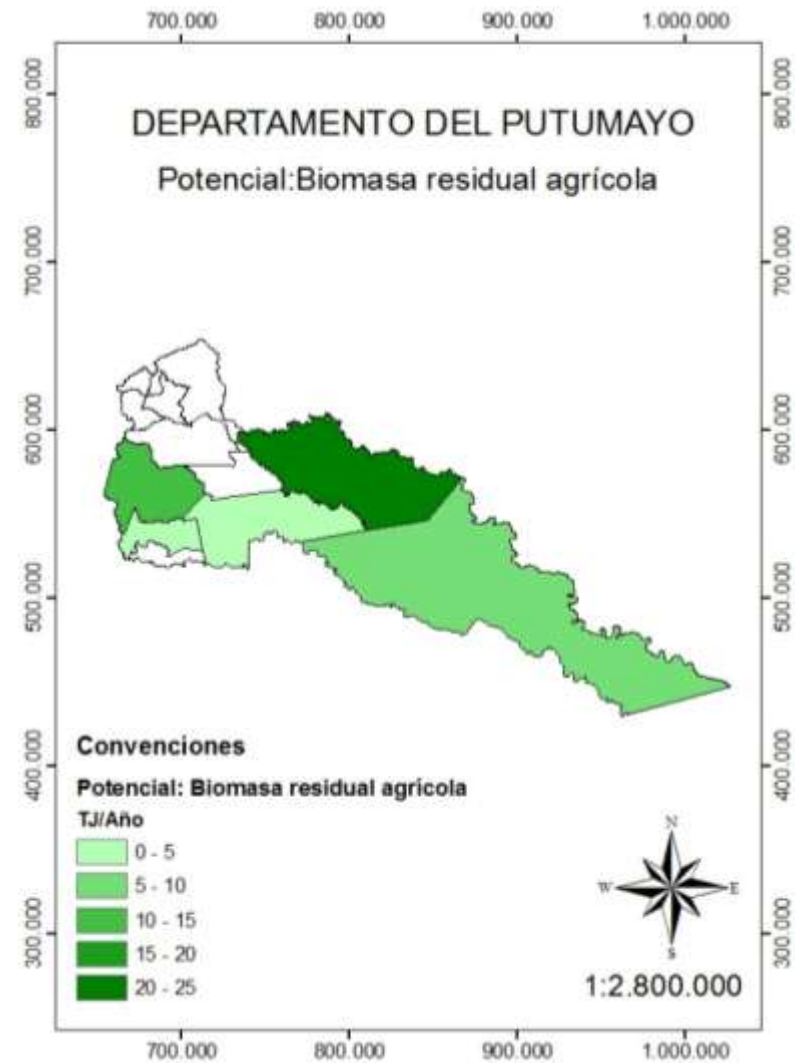


Figura 16. Mapa del potencial energético en las ZNI de Putumayo.



En los mapas, los dos municipios por departamento que ofrecieron un mayor potencial energético, fueron:

- Caquetá: Cartagena del Chairá (65,07 TJ/año) y Solita (48,95 TJ/año).
- Chocó: Riosucio (203,49 TJ/año) y Carmen de Darién (111,27 TJ/año).
- Meta: Puerto Gaitán (131, 12 TJ/año) y Vista Hermosa (24,62 TJ/año).
- Putumayo: Puerto Guzmán (23,37 TJ/año) y Orito (13,89 TJ/año).

En el Anexo D se encuentra el potencial energético para todos los municipios pertenecientes a las ZNI de los cuatro departamentos.

7.6 ANÁLISIS MULTIVARIANTE ENFOCADO A LA IDENTIFICACIÓN DE LAS TECNOLOGÍAS DE APROVECHAMIENTO ENERGÉTICO PARA LOS RAC

Los coeficientes de correlación momento - producto de Pearson entre cada par de variables se muestran en la Tabla 9. El rango de estos coeficientes de correlación va de -1 a +1, y miden la fuerza de la relación lineal entre las variables. Los valores en rojo representan la significancia estadística de la correlación (valor - P) menor que 0,05.

Tabla 9. Matriz de correlación para los datos de la tabla 5.

	Hu	ST	C	H	O	N	S	Cenizas	SV+CF
ST	-0,999								
C	-0,578	0,572							
H	-0,575	0,569	0,971						
O	-0,550	0,544	0,918	0,986					
N	0,023	-0,029	-0,133	-0,071	-0,029				
S	0,214	-0,197	-0,308	-0,270	-0,234	0,480			
Cenizas	0,751	-0,742	-0,482	-0,416	-0,353	0,172	0,348		
SV+CF	-0,765	0,758	0,494	0,429	0,366	-0,178	-0,352	-0,999	
PCI	-0,573	0,568	0,997	0,951	0,886	-0,145	-0,307	-0,496	0,508

La matriz de dispersión complementa este análisis multivariante y se muestra en la Figura 17. Como era de esperarse por su relación con el análisis básico se observa una fuerte correlación lineal negativa entre la humedad y los sólidos totales de todos los residuos. Del análisis elemental se observa que el contenido de carbono de todos los residuos presenta una fuerte correlación lineal positiva con los átomos de hidrógeno y oxígeno. Esto no es nada extraño si se tiene en cuenta que, junto con el nitrógeno quien también está correlacionado fuertemente con el oxígeno en este análisis, conforman los elementos más comunes en los organismos vivos. Por su parte, los datos correspondientes al análisis próximo se correlacionaron fuertemente entre sí de forma negativa, indicando como se sabía, por deducción de la fórmula para calcular este análisis, que el aumento en el porcentaje de sólidos volátiles y el carbono fijo representa una disminución en el porcentaje de ceniza.



Figura 17. Matriz de dispersión para el análisis de correlación de Pearson.

La contribución más importante de este análisis tal vez la representan las correlaciones con el poder calorífico inferior (PCI), ya que esta es la propiedad fisicoquímica medida de los residuos de la que se dispone en este trabajo y que mejor se puede asociar con la tecnología de aprovechamiento energético de combustión. Las correlaciones más fuertes con esta variable las representan el contenido de carbono, hidrógeno y oxígeno. Sin embargo, si se tiene en cuenta la significancia estadística del valor - P, otras tres variables entrarían en consideración: la humedad, la cantidad de sólidos totales y la sumatoria de los sólidos volátiles con el carbono fijo. Si bien es cierto que en el gráfico de dispersión de estas correlaciones (Figura 17) no se observa una fuerte tendencia lineal que las acerquen a 1 o -1, el análisis muestra que las correlaciones si son significativamente diferentes de cero con un nivel de confianza del 95%. Lo que indica que la variable no afecta linealmente al PCI, pero no descarta un efecto lineal múltiple con las otras variables de estudio.

Debido a esa limitante, se hace necesario emplear otro método estadístico multivariante que permita encontrar un número reducido de combinaciones lineales de las variables que describan cada muestra de tal manera que sea posible explicar la mayor variabilidad de los datos originales. El método estadístico idóneo para este trabajo es el mencionado análisis de componentes principales.

Usando en software estadístico *Statgraphics Centurion XV* se encontró la matriz de pesos P que mejor representó el cambio de coordenadas de la matriz de datos originales X (tabla 5). La Tabla 10 muestra los resultados estadísticos de varianza y varianza acumulada de cada una de las componentes junto con los eigenvalores que representan la porción de la varianza total explicada por cada componente.

Como se puede observar en la Tabla 10 las tres primeras componentes de la nueva matriz de datos Y, representan el 89,29% de la variabilidad total de los datos correspondientes a la matriz de datos original.

Tabla 10. Eigenvalores y varianza de los componentes

Comp.	Eigenvalor	% Varianza	% Acumulado
1	5,11	56,75	56,75
2	1,55	17,19	73,94
3	1,38	15,35	89,29
4	0,50	5,52	94,82
5	0,40	4,45	99,27
6	0,06	0,72	99,99
7	0,00	0,01	100,00
8	0,00	0,01	100,00
9	0,00	0,00	100,00

La Figura 18 muestra el gráfico de sedimentación de los eigenvalores donde se ratifica, para este caso, que tres componentes deberían ser extraídas, puesto que tres componentes tuvieron eigenvalores mayores que 1, lo que también favorece para que los diferentes residuos puedan ser representadas en un diagrama tridimensional.

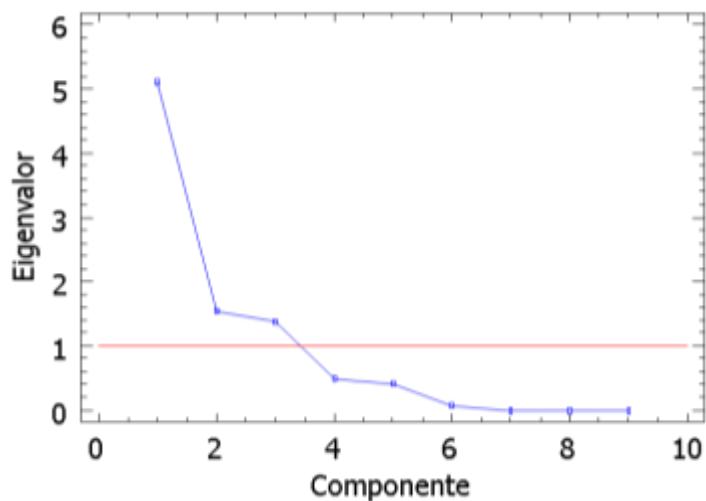


Figura 18. Gráfico de sedimentación para eigenvalores.

Tabla 11. Tabla de pesos de las componentes principales o matriz P truncada en las tres primeras componentes.

	Comp. 1	Comp 2.	Comp 3.
Humedad	0,39	0,13	0,27
Sólidos Totales	-0,39	-0,13	-0,28
Carbono	-0,38	0,35	0,17
Hidrógeno	-0,37	0,42	0,15
Oxígeno	-0,35	0,46	0,13
Nitrógeno	0,08	0,32	-0,64
Azufre	0,18	0,26	-0,57
Cenizas	0,36	0,38	0,14
SV_CF	-0,36	-0,38	-0,14

Tabla 12. Tabla de nuevas coordenadas para cada uno de los RAC o matriz Y.

Residuo	Sigla	Comp. 1	Comp. 2	Comp. 3
Hojas plátano Caquetá	HPC	0,33	0,76	-0,09
Vástago plátano Caquetá	VPC	0,92	0,77	2,03
Rastrojo maíz Caquetá	RMC	-3,43	1,04	1,27
Rastrojo yuca Caquetá	RYC	-2,41	0,66	0,09
Hojas y cogollos caña Caquetá	HCC	-0,52	0,46	0,12
Hojas plátano Chocó	HPCHO	1,23	1,59	-2,99
Vástago plátano Chocó	VPCHO	3,17	-0,43	0,67
Hojas banano Chocó	HBCHO	1,79	0,30	-1,40
Vástago banano Chocó	VBCHO	2,38	0,65	0,76
Podas Borojó Chocó	PBCHO	-3,33	-1,36	-0,98
Rastrojo maíz Meta	RMM	-4,03	0,11	0,06
Tamo arroz Meta	TAM	0,44	1,92	0,11
Hojas plátano Putumayo	HPP	1,11	-1,83	-0,83
Vástago plátano Putumayo	VPP	2,90	-0,78	1,03
Hojas palmito Putumayo	HPmP	-0,31	-2,03	-0,31
Tallo palmito Putumayo	TPmP	-0,26	-1,85	0,47

Las correspondientes matrices de peso P y la matriz de nuevas coordenadas Y truncadas en las primeras tres componentes corresponden a las Tablas 11 y 12, respectivamente. Los datos contenidos en la Tabla 12 pueden ser mejor representados en un gráfico de dispersión donde los valores de cada columna para cada residuo correspondan a cada uno de los ejes de un espacio tridimensional.

En la Figura 19 se observa un gráfico representado lo anterior mediante un diagrama de dispersión 3D donde los puntos corresponden a cada uno de los tratamientos (RAC) y las coordenadas a cada uno de los componentes (combinación lineal de las variables).

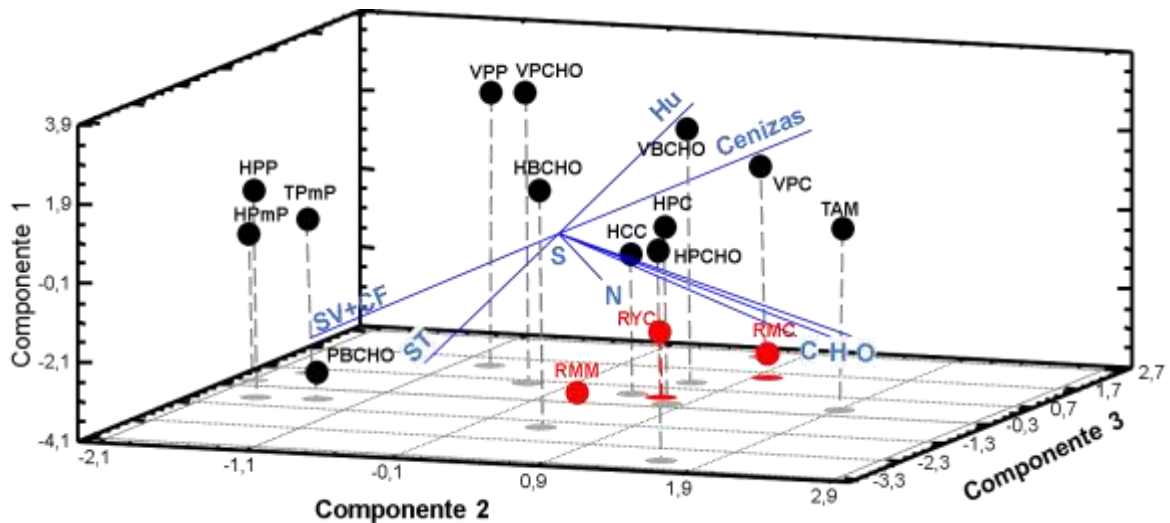


Figura 19. Dispersión de las muestras mediante el análisis de componentes principales PCA.

Las líneas continuas de la gráfica representan los pesos de las variables en cada una de los componentes. Las proximidades a las líneas indican una fuerte relación de la variable con el residuo. Lo que da nociones sobre la favorabilidad que tendrían los métodos de generación de energía teniendo en cuenta individualmente a cada residuo. La gráfica también muestra unos puntos resaltados en color rojo que

representan los residuos que mejor tienen PCI, por tanto, serían mejores en métodos termoquímicos.

En la Figura 19 se puede observar que las muestras de vástago de plátano de Caquetá (VPC), vástago de plátano de Chocó (VPCHO), vástago de banano del Chocó (VBCHO) y vástago de plátano de Putumayo (VPP) tienen un alto contenido de humedad y alto contenido de cenizas. Debido a esto, se sugiere el uso de un proceso de conversión bioquímica, ya que, un pretratamiento de secado incurriría en altos costos por el alto porcentaje de humedad que contienen los residuos. Por otra parte, el alto contenido de cenizas es un factor negativo en el uso de procesos termoquímicos, debido al bajo poder calorífico que estas generan y a problemas de incrustación, aglomeración, escoriación, corrosión y erosión, entre otros (Vassilev *et al.*, 2015).

El tamo de arroz del Meta (TAM), las hojas y cogollos de caña panelera de Caquetá (HCC), las hojas de plátano de Putumayo (HPP), el tallo de palmito de Putumayo (TPmP) y las hojas de palmito de Putumayo (HPmP) presentan un menor contenido de humedad en comparación a los vástagos de plátano y banano. Además, los residuos HPP, TPmP y HPmP presentan altos contenidos de sólidos volátiles más carbono fijo y bajos contenidos de cenizas, por lo que se sugiere que estos cinco residuos sean aprovechados mediante un proceso termoquímico con un pretratamiento previo de secado.

Las hojas de plátano de Caquetá (HPC) se encuentran en una posición similar a los anteriores residuos, pero por conveniencia en el manejo de residuos y por su alto contenido en carbono y nitrógeno, se sugiere que sea utilizado en un proceso bioquímico, el mismo proceso que se usaría para el vástago de plátano de Caquetá.

De la misma manera, las hojas de banano de Chocó (HBCHO) y las hojas de plátano de Chocó (HPCHO) presentaron más bajo contenido de humedad en comparación a los vástagos, lo que permite inferir que se podrían aprovechar termoquí-

micamente con un secado previo, pero dado su alto contenido de nitrógeno y azufre, se sugiere el uso de un proceso bioquímico para su aprovechamiento porque en combustión producirían alto contenido de gases NO_x y SO_x .

Por otra parte, los residuos podas de borjón de Chocó (PBCHO), rastrojo de maíz del Meta (RMM), rastrojo de maíz de Caquetá (RMC) y rastrojo de yuca de Caquetá (RYC) presentaron los más bajos contenidos de humedad, altos contenidos de sólidos volátiles más carbono fijo, bajos contenidos de cenizas, altos contenidos de carbono y bajos contenidos de nitrógeno y azufre. Por lo anterior, se sugiere que estos residuos sean aprovechados energéticamente mediante un proceso termoquímico, con un tratamiento de secado previo. Además, los residuos RMM, RMC y RYC, resaltados en rojo, son los que presentaron mayor poder calorífico inferior con valores por encima de los 13.000 kJ/kg.

CONCLUSIONES

Los departamentos que presentaron una mayor demanda energética en las ZNI de Colombia, que no poseen planes de energización rural establecidos y que tienen disponibilidad de residuos agrícolas fueron: Chocó (35,3 GWh), Putumayo (18,1 GWh), Caquetá (17,6 GWh) y Meta (13,8 GWh).

Los cultivos de maíz, arroz, caña panelera, plátano, banano, yuca, borjón y palmito, seleccionados en los departamentos de estudio, ofrecieron un total de 1.621 kt/año de residuos agrícolas de cosecha. Estos aportaron un potencial energético de 1.001 TJ/año, siendo el departamento de Chocó el que ofreció mayor cantidad de residuos (1.147 kt/año) con un aporte en potencial energético de 528 TJ/año.

Los mejores residuos agrícolas de cosecha, en términos de potencial energético, para cada departamento fueron: rastrojo de maíz de Caquetá (81,6 TJ/año), vástago de plátano del Chocó (326,7 TJ/año), rastrojo de maíz del Meta (175,5 TJ/año) y vástago de plátano del Putumayo (32,5 TJ/año).

El potencial energético de los RAC calculado en los cuatro departamentos correspondió a 83,42 GWh/año, lo que abastecería el 98,3% del total de demanda energética (84,83 GWh/año) que presentaron las ZNI de los departamentos de estudio.

Con base en el análisis multivariante se determinó que los mejores residuos para ser aprovechados mediante procesos termoquímicos son: podas de borjón de Chocó (PBCHO), rastrojo de maíz del Meta (RMM), rastrojo de maíz de Caquetá (RMC) y rastrojo de yuca de Caquetá (RYC). Así mismo, se demostró que el vástago de plátano de Caquetá (VPC), vástago de plátano de Chocó (VPCHO), vástago de banano del Chocó (VBCHO) y vástago de plátano de Putumayo (VPP) es más favorable aprovecharlos energéticamente mediante procesos bioquímicos.

BIBLIOGRAFÍA

ACEVEDO, E. (2006). Agroenergía. Un desafío para Chile. Santiago, Universidad de Chile. Serie Ciencias Agronómicas N°11, 103.

AENE CONSULTORÍA S.A. (2003). Potencialidades de los cultivos energéticos y residuos agrícolas en Colombia. Resumen ejecutivo realizado para la UPME. DOCUMENTO N°: ANC-631 – 03. Bogotá.

AKHTAR, J., & Saidina Amin, N. (2012). A review on operating parameters for optimum liquid oil yield in biomass pyrolysis. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16, 5101-5109.

ANGELIS-DIMAKIS, A., Biberacher, M., Dominguez, J., Fiorese, G., Gnansounou, E., Robba, M. (2011). Methods and tools to evaluate the availability of renewable energy sources. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15.

ARIAS, T. *et al.* (2009). Task 2.1. Feedstock production in Latin America. *Biofuels Assessment on Technical Opportunities and Research Needs for Latin America*. BioTop Project No. FP7-213320.

BATIDZIRAI, B., Smeets, E.M.W., Faaij, A.P.C. (2012). Harmonising bioenergy resource potentials—Methodological lessons from review of state of the art bioenergy potential assessments. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16, 6598–6630.

Biomass Energy Center (BEC). (2011). Sources of biomass. UK Forestry Commission. Disponible en: http://www.biomassenergycentre.org.uk/portal/page?_pageid=76,15049&_dad=portal&_schema=PORTAL. Revisado el: 23.03.2016.

BROWN, D., Shi, J., Li, Y. (2012). Comparison of solid-state to liquid anaerobic digestion of lignocellulosic feedstocks for biogas production. *Bioresource Technology*, 124, 379 – 386.

CARDOEN, D., Joshi, P., Diel, L., Sarma, P., Pant, D. (2015). Agriculture biomass in India: Part 1. Estimation and characterization. *Resources, Conservation and Recycling*, 102. 39 - 48.

CARNEIRO, P., & Ferreira, P. (2012). The economic, environmental and strategic value of biomass. *Renewable Energy*, 44, 17- 22.

CHADWICK, D. T., McDonnell, K. P., Brennan, L. P., Fagan, C. C., Everard, C. D. (2014). Evaluation of infrared techniques for the assessment of biomass and biofuel quality parameters and conversion technology processes: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 30, 672 – 681.

CHINNICI, G., D'amico, M., Rizzo, M., Pecorino, B. (2015). Analysis of biomass availability for energy use in Sicily. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 52, 1025–1030.

Corporación para la Energía y el Medio Ambiente (CORPOEMA). (2010). Formulación de un Plan de Desarrollo para las Fuentes No Convencionales de Energía en Colombia (PDFNCE). Vol. 1. Bogotá. Disponible en: http://www.upme.gov.co/Sigic/DocumentosF/Vol_1_Plan_Desarrollo.pdf.

CUTZ, L., Haro, P., Santana, D., Johnsson, F. (2016). Assessment of biomass energy sources and technologies: The case of Central America. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 58, 1411-1431.

ESCALANTE, H. H., Orduz Prada, J., Zapata Lesmes, H. J., Cardona Ruiz, M. C., Duarte Ortega, M. (2011). Atlas del Potencial Energético de la Biomasa Residual en Colombia. Universidad Industrial de Santander, Unidad de Planeación Minero Energética (UPME), Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales de Colombia (IDEAM).

FAAIJ, A. (2006). Modern Biomass Conversion Technologies. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, 11, 343 – 375.

FLÓREZ, J., Tobón, D., Castillo, G. (2009). ¿Ha sido efectiva la promoción de soluciones energéticas en las zonas no interconectadas (ZNI) en Colombia?: un análisis de la estructura institucional. *Cuadernos de Administración*, 22, Núm. 38, 219-245. Pontificia Universidad Javeriana, Colombia.

FRANCO, C., Dyner, I., Hoyos, S. (2008). Contribución de la Energía al Desarrollo de Comunidades Aisladas no Interconectadas: Un Caso de Aplicación de la Dinámica de Sistemas y los Medios de Vida Sostenibles en el Suroccidente Colombiano. *Revista Dyna*, 75, Núm. 154.

GANI, A., & Naruse, I. (2007). Effect of cellulose and lignin content on pyrolysis and combustion characteristics for several types of biomass. *Renewable Energy*, 32, 649-661.

GONZALEZ-SALAZAR, M. A., Morini, M., Pinelli, M.; Spina, P. R.; Venturini, M.; Finkenrath, M.; Poganietz, W. R. (2014). Methodology for estimating biomass energy potential and its application to Colombia. *Applied Energy*, 136, 781-796.

HILOIDHARI, M., DhimanDas, Baruah, D. C. (2014). Bioenergy potential from crop residue biomass in India. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 32, 504 – 512.

International Energy Agency (IEA), *World Energy Outlook 2015, Executive summary*. (2015). Paris, Francia. Disponible en: <http://www.iea.org/publications/freepublications/publication/WEB_WorldEnergyOutlook2015ExecutiveSummaryEnglishFinal.pdf> accessed 11.12.2015.

IPSE. Informe Rendición Social de Cuentas, 2014 - 2015. [En línea]. Disponible en: <http://www.ipse.gov.co/atencion-ciudadano/seguimiento-spqr/rendicion-de-cuentas>.

IYE, E. L., & Bilsborrow, P. E. (2013). Assessment of the availability of agricultural residues on a zonal basis for medium- to large-scale bioenergy production in Nigeria. *Biomass and Bioenergy*, 48, 66-74.

KAN, T., Strezov, V., Evans, T. J. (2016). Lignocellulosic biomass pyrolysis: A review of product properties and effects of pyrolysis parameters. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 57, 1126-1140.

KEMAUSUOR, F., Kamp, A., Tjalfe Thomsen, S.; Cudjoe Bensah, E., Østergård, H. (2014). Assessment of biomass residue availability and bioenergy yields in Ghana. *Resources, Conservation and Recycling*, 86, 28–37.

KHAN, A. A, Jonga, W. D, Jansens, P. J, Spliethoff, H. (2009). Biomass combustion in fluidized bed boilers: potential problems and remedies. *Fuel Process Technol.*, 90, 21–50.

KLINE, K. L., Wolfe, A. K., Perlack, R. D., Dale, V. H., & McMahon, M. (2007). Bio-fuel Feedstock Assessment for Selected Countries. Oak Ridge National Laboratory (ORNL). Special Report for the U.S. Department of Energy. ORNL/TM-2007/224.

KOOPMANS, A., & Koppejan, J. (1997). Agricultural and forest residues - Generation, utilization and availability. Regional Consultation on Modern Applications of Biomass Energy. Disponible en: <http://www.fao.org/docrep/006/AD576E/ad576e00.pdf>.

LI, Y., Park, S. Y., Zhu, J. (2011). Solid-state anaerobic digestion for methane production from organic waste. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15, 821 – 826.

LORA E. S., & Andrade, R. V. (2009). Biomass as energy source in Brazil. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 13, 777–788.

LOURINHO, G., & Brito, P. (2015). Assessment of biomass energy potential in a region of Portugal (Alto Alentejo). *Energy*, 81, 189- 201.

MANKIN, Emily. Principal Components Analysis: A How - To Manual for R. Disponible en: http://psych.colorado.edu/wiki/lib/exe/fetch.php?media=labs:learnr:emily_-_principal_components_analysis_in_r:pca_how_to.pdf.

MANZANO-AGUGLIARO, F., Alcayde, A., Montoya, F.G., Zapata-Sierra, A., Gil, C. (2013). Scientific production of renewable energies worldwide: An overview. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 18, 134–143.

MCKENDRY, P. (2002). Energy production from biomass (part 2): conversion technologies. *Bioresource Technology*, 83 (1), 47–54.

MILLER, J. N., & Miller, J. C. (2010). *Statistics and chemometrics for analytical chemistry*. Pearson Education. England.

Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural (MINAGRICULTURA). (2013). Red de Información y Comunicación del Sector Agropecuario Colombiano (AGRONET), Anuario Estadístico del Sector Agropecuario, Base Agrícola EVA 2007 - 2012. Disponible en: <http://www.agronet.gov.co/estadistica/Paginas/default.aspx>.

Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural (MINAGRICULTURA). (2016). Red de Información y Comunicación del Sector Agropecuario Colombiano (AGRONET), Anuario Estadístico del Sector Agropecuario, Base Agrícola EVA 2007-2015. Disponible en: <http://www.agronet.gov.co/estadistica/Paginas/default.aspx>. Consultado: Junio, 2016.

Ministerio de Energía del Gobierno de Chile (MINENERGÍA), Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y Agricultura (FAO), Programa de las Naciones Unidas para el desarrollo (PNUD), Global Environment Facility (GEF). (2011). Manual de biogás. Santiago de Chile.

Ministerio de Minas y Energía (MME), Unidad de Planeación Minero Energética (UPME). (2010). Programa de Uso Racional y Eficiente de Energía y Fuentes no Convencionales (PROURE). Plan de Acción Indicativo 2010 - 2015. Bogotá.

Ministerio de Minas y Energía (MME), Instituto de Planeación y Promoción de Soluciones Energéticas para las Zonas no Interconectadas (IPSE). (2011). Universidad Nacional de Colombia-Sede Medellín, Facultad de Minas. Centro de Innovación Tecnológica con Énfasis en Gasificación.

MONTI, A., Di Virgilio, N., Venturi, G. (2008). Mineral composition and ash content of six major energy crops. *Biomass and Bioenergy*, 32, 216 – 223.

NAKOMCIC-SMARAGDAKIS, B., Cepic, Z., Dragutinovic, N. (2016). Analysis of solid biomass energy potential in Autonomous Province of Vojvodina. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 57, 186–191.

ORDUZ, J. (2011). Modelo matemático para evaluar el potencial energético de la biomasa residual agrícola en Colombia (Tesis Maestría). Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga.

PANG, C. H., Gaddipatti, S., Tucker, G., Lester, E., WU, T. (2014). Relationship between thermal behaviour of lignocellulosic components and properties of biomass. *Bioresource technology*, 172, 312-20.

PASANGULAPATI, V., Ramachandriya, K. D., Kumar, A., Wilkins, M. R., Jones, C. L., Huhnke, R. L. (2012). Effects of cellulose, hemicellulose and lignin on thermochemical conversion characteristics of the selected biomass. *Bioresource Technology*, 114, 663-669.

PATEL, M., Zhang, X., Kumar, A. (2016). Techno-economic and life cycle assessment on lignocellulosic biomass thermochemical conversion technologies: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 53, 1486–1499.

PÉCORA, A. A. B., Ávila, I., Lira, C. S., Cruz, G., Crnkovic, P. M. (2014). Prediction of the combustion process in fluidized bed based on physical–chemical properties of biomass particles and their hydrodynamic behaviors. *Fuel Processing Technology*, 124, 188-197.

PEDUZZI, E., Boissonnet, G., Maréchal, F. (2016). Biomass modelling: Estimating thermodynamic properties from the elemental composition. *Fuel*, 181, 207 – 217.

PINEDO, I. (2010). Tesis Doctoral: IntiGIS: Propuesta metodológica para la evaluación de alternativas de electrificación rural basada en SIG. Universidad Politécnica de Madrid. Madrid.

PORTUGAL-PEREIRA, J., Soria, R., Rathmann, R., Schaeffer, R., Szklo, A. (2015). Agricultural and agro-industrial residues-to-energy: Techno-economic and environmental assessment in Brazil. *Biomass and Bioenergy*, 81, 521-533.

QIU, H., Sun, L., Xu, X., Cai, Y., & Bai, J. (2014). Potentials of crop residues for commercial energy production in China: A geographic and economic analysis. *Biomass and Bioenergy*, 64, 110–123.

ROBERTS, J. J., Cassula, A. M., Prado, P. O., Alves Dias, R., Perrella Balestieri, J. A. (2015). Assessment of dry residual biomass potential for use as alternative energy source in the party of General Pueyrredón, Argentina. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 41, 568–583.

RUIZ, J.A., Juárez, M.C., Morales, M.P., Muñoz, P., Mendivil, M.A. (2013). Biomass gasification for electricity generation: Review of current technology barriers. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 18, 174–183.

SAWATDEENARUNAT, C., Surendra, K.C., Takara, D., Oechsner, H., Khanal, S. K. (2015). Anaerobic digestion of lignocellulosic biomass: Challenges and opportunities. *Bioresource Technology*, 178, 178 – 186.

SCARLAT, N., Martinov, M., & Dallemand, J. F. (2010). Assessment of the availability of agricultural crop residues in the European Union: Potential and limitations for bioenergy use. *Waste Management*, 30 (10), 1889–1897.

SHLENS, J. (2005). A Tutorial on Principal Component Analysis. Systems Neurobiology Laboratory, Salk Institute for Biological Studies. Version 2.

SHONHIWA, C. (2013). An assessment of biomass residue sustainably available for thermochemical conversion to energy in Zimbabwe. *Biomass and bioenergy*, 52, 131 – 138.

SLUITER, A., Ruiz, R., Scarlata, C., Sluiter, J., Templeton, D. (2008). Determination of Extractives in Biomass, Laboratory Analytical Procedure (LAP). National Renewable Energy Laboratory (NREL), Technical Report: NREL/TP-510-42619.

SLUITER, A., Hames, B., Ruiz, R., Scarlata, C., Sluiter, J., Templeton, D., Crocker, D. (2012). Determination of Structural Carbohydrates and Lignin in Biomass, Laboratory Analytical Procedure (LAP). National Renewable Energy Laboratory (NREL), Technical Report: NREL/TP-510-42618.

TELMO, C., Lousada, J., & Moreira, N. (2010). Proximate analysis, backwards stepwise regression between gross calorific value, ultimate and chemical analysis of wood. *Bioresource Technology*, 101(11), 3808–15.

ULLAH, K., Kumar Sharma, V., Dhingra, S., Braccio, G., Ahmad, M., & Sofia, S. (2015). Assessing the lignocellulosic biomass resources potential in developing countries: A critical review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 51, 682–698.

Unidad de Planeación Minero Energética (UPME). (2010). Programa de Uso Racional y Eficiente de Energía y Fuentes no Convencionales (PROURE). Plan de Acción Indicativo 2010 - 2015. Bogotá.

Unidad de Planeación Minero Energética (UPME). (2013). Cobertura de Energía Eléctrica a 2012. Colombia. Disponible en: <http://www.siel.gov.co/Inicio/CoberturaDelSistemaInterconectadoNacional/Publicaciones/tabid/83/Default.aspx>.

Unidad de Planeación Minero Energética (UPME). (2014). Plan Indicativo de Expansión de Cobertura de Energía Eléctrica 2013 – 2017. Colombia.

USLU, A., Faaij, A., Bergman, P.C.A. (2008). Pre-treatment technologies, and their effect on international bioenergy supply chain logistics. Techno-economic evaluation of torrefaction, fast pyrolysis and pelletisation. *Energy*, 33, 1206 - 1223.

VARGAS-MORENO, J. M., Callejón-Ferre, A. J., Pérez-Alonso, J., & Velázquez-Martí, B. (2012). A review of the mathematical models for predicting the heating value of biomass materials. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16(5), 3065–3083.

VASSILEV, S. V., Baxter D., Andersen L. K., Vassileva C. G. (2010). An overview of the chemical composition of biomass. *Fuel*, 89, 913–33.

VASSILEV, S. V., Vassileva, C. G., Vassilev, V. S. (2015). Advantages and disadvantages of composition and properties of biomass in comparison with coal: An overview. *Journal Fuel*, 158, 330-350.

WORASUWANNARAK, N., Sonobe, T., Tanthapanichakoon, W. (2007). Pyrolysis behaviors of rice straw, rice husk, and corncob by TG-MS technique. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 78, 265-271.

World Energy Council (WEC). (2013). *World Energy Resources, 2013 Survey*. England.

YIN, C.-Y. (2011). Prediction of higher heating values of biomass from proximate and ultimate analyses. *Fuel*, 90(3), 1128–1132.

ZHANG, L., Xu, C., Champagne, P. (2010). Overview of recent advances in thermo-chemical conversion of biomass. *Energy Conversion and Management*, 51, 969–82.

ANEXOS

Anexo A. Registro fotográfico del muestreo realizado en Caquetá, Chocó, Meta y Putumayo.

CAQUETÁ



CHOCÓ





META



PUTUMAYO






Anexo B. Procedimiento analítico de laboratorio para la determinación del análisis estructural.

A continuación, se presenta de forma resumida el procedimiento analítico de laboratorio llevado a cabo para la determinación de extractivos en biomasa (Sluiter *et al.*, 2008) y la determinación de carbohidratos estructurales y lignina en biomasa (Sluiter *et al.*, 2012) suministrado por el *National Renewable Energy Laboratory – NREL*.

FASE	PROCEDIMIENTO	FUNCIÓN	EQUIPO UTILIZADO
Secado y molienda	Se colocan los residuos en el horno a 105 °C por 24 horas, seguido a ello se trituran y se tamizan en mallas N° 20, 60 y 80.	Retirar humedad y preparar las muestras para la caracterización.	Horno
Extracción Soxhlet	Se realiza la extracción empleando inicialmente agua destilada y continuando con etanol.	Retirar impurezas presentes en las muestras, para hacer más eficiente la caracterización	Manta
Hidrólisis 1	Las muestras se exponen a una primera hidrólisis en ambiente acuoso con ácido sulfúrico al 72%, con una Temperatura de 30 °C durante 1 hora.	Variación de los polímeros de glucosa en azúcares sencillos	Cabina extractora de gases y humos C4 MEX120
Hidrólisis 2	En la segunda hidrólisis se baja la concentración de ácido sulfúrico al 4%, se colocan las muestras en el autoclave a una temperatura de 121 °C durante 1 hora.	Variación de los polímeros de glucosa en azúcares sencillos.	Autoclave: 25X-1 all american
Filtración	Se filtran las muestras al vacío y se lavan con 250 ml de agua destilada. Se recogen dos muestras del líquido filtrado para realizar	Disociar el Sólido del líquido brindando un área de filtración menor	Bomba: ROCKER 400 power AC 100-120 v

	cromatografía y neutralización.	para recoger mejor la muestra.	
Neutralización	Se neutraliza con carbonato de calcio para que suceda la reacción con el ácido y disminuya el pH en un rango de 4-6.	Determinar el PH de cada muestra, éste debe mantenerse entre 4 y 6 para prevenir pérdidas de azúcares.	-----
Centrifugación	Se centrifuga la muestra neutralizada a 3000 rpm durante 5 minutos.	Separar la mezcla en dos fases, con el fin de obtener una fase liviana para realizar cromatografía.	-----
Espectrofotometría	Determinar la absorbancia a 240 nm en el espectro UV-visible.	Medir el porcentaje de lignina presente en la biomasa.	Espectroscopio: Spectroquant pharo 300 MERCK
Cromatografía Líquida de Alta Presión HPLC	Se prepara una fase móvil con una concentración de 5 µL de ácido sulfúrico y se prepara el equipo para su uso. El equipo consta de un desgasificador (1), una bomba de alta presión (2), un inyector (3), un detector (4) y un registrador (5).	Determinar la cantidad de compuestos presentes en las muestras.	<ol style="list-style-type: none"> 1. Prominence degasse DGU-20A3. 2. Prominence liquid chromatograph UTLC Shimadzu LC20AD. 3. Prominence auto-sampler shimadzu. SIL-20A HT 4. Refractive index detector: RID-10^a 5. Prominence column oven: CTO-20AC

Anexo C. Ejemplo de la plantilla descriptiva usada en el sitio de muestreo.

	<p align="center">PLANTILLA DESCRIPTIVA DEL SITIO A MUESTREAR Zonas no Interconectadas de Colombia</p>	<p align="center">Centro de Investigación para el Desarrollo Sostenible en Industria y Energía CIDES</p>
---	---	---

MUESTRA No. 1

Fecha 27 de mayo de 2015 Finca Km 12
 Vereda Silvania Municipio Orito Departamento Putumayo
 Evaluador responsable Katherine Rodríguez
 Personal que atendió al evaluador Libardo Jimenez Daza

1. CARACTERÍSTICAS DEL SITIO

Clima del día Soleado Temperatura _____
 Terreno húmedo Terreno seco _____
 Observaciones El cultivo queda cerca a un oleoducto.

2. CARACTERÍSTICAS DEL CULTIVO

Nombre común del cultivo Caña Panelera
 No. de hectáreas cultivadas 4 ha
 Distancia de siembra del cultivo 2 m x 1.50 m
 Tipo de abono _____
 Siembra tradicional Siembra tecnificada _____
 Cosecha tradicional Cosecha tecnificada _____
 Cuáles son las vías de acceso al cultivo:
 Automóvil Lancha o barca _____ Caballo o mula _____ A pie Otro _____
 ¿Cuál? _____

Residuos generados en la cosecha hojas y cogollos
 Observaciones El borbato en su totalidad es usado en los hornos, la caldera. La ceniza que sale de la combustión la usan como abono en el mismo cultivo. El suelo de este cultivo es un suelo cansado, el cultivo tiene 20 años, o el suelo ha sido cultivado con caña durante 20 años.

3. USO ACTUAL DE BIOMASA RESIDUAL

Abono Biodigestión _____ Compostaje _____ Cocción de alimentos _____ Ninguno _____
 Conoce proyectos donde utilicen este tipo de biomasa _____

Observaciones las hojas y los cogollos se dejan en el terreno como abono al momento de la cosecha.

Anexo D. Municipios pertenecientes a las ZNI de los departamentos de estudio y su potencial energético.

Departamento	Municipios	% Participación En ZNI	Tipo de Zona	Potencial Energético (TJ/kg)
Caquetá	Belén Andaquies	28%	Mixto	27,35
	Cartagena del Chaira	65%	Mixto	65,07
	Curillo	47%	Mixto	8,01
	El Paujil	43%	Mixto	1,39
	La Montañita	67%	Mixto	4,87
	Milán	65%	Mixto	13,54
	Puerto Rico	34%	Mixto	8,97
	San Vicente del Caguán	34%	Mixto	41,78
	Solano	100%	ZNI	10,79
	Solita	45%	Mixto	48,95
Valparaíso	46%	Mixto	2,94	
Chocó	Acandí	100%	ZNI	6,67
	Alto Baudó (Pie De Pato)	100%	ZNI	45,59
	Bagado	67%	Mixto	1,37
	Bahía Solano (Mutis)	100%	ZNI	1,30
	Bajo Baudó (Pizarro)	76%	Mixto	3,47
	Bojayá (Bellavista)	100%	ZNI	18,85
	Cantón De San Pablo + Capurganá	28%	Mixto	2,20
	Carmen Del Darien	100%	ZNI	111,27
	Certegui	21%	Mixto	0,65
	Litoral Del San Juan	100%	ZNI	1,72
	Jurado	100%	ZNI	2,92
	Lloro	52%	Mixto	2,05
	Medio Atrato	100%	ZNI	5,25
	Medio Baudó	77%	Mixto	11,63
	Medio San Juan	25%	Mixto	6,48
	Novita	53%	Mixto	2,80
Nuquí	100%	ZNI	6,56	
Rio Iro	25%	Mixto	2,40	

	Rio Quito	36%	Mixto	3,88
	Riosucio	80%	Mixto	203,49
	Sipi	100%	ZNI	9,96
	Unguía	100%	ZNI	77,00
	Unión Panamericana	11%	Mixto	0,61
	El Calvario	34%	Mixto	0,14
	Mapiripán y Pto Elvira	100%	ZNI	7,51
	La Macarena	100%	ZNI	7,46
Meta	La Uribe	49%	Mixto	7,83
	Puerto Concordia	33%	Mixto	8,14
	Puerto Gaitán	28%	Mixto	131,12
	Puerto Rico	59%	Mixto	1,22
	Vista Hermosa	41%	Mixto	24,62
	Orito	41%	Mixto	13,89
	Puerto Asís	38%	Mixto	1,81
Putumayo	Puerto Guzmán	63%	Mixto	23,37
	Puerto Leguízamo	100%	ZNI	9,62
	Valle del Guamuez	43%	Mixto	2,49