



UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA

Estudio del potencial biomásico forestal arbóreo en la generación de bioenergía para zonas no interconectadas del valle del cauca y caldas utilizando sensores remotos

José Wilson Murillo Lozano

Universidad Nacional de Colombia
Facultad de Ingeniería y Administración
Escuela de Posgrado
Palmira, Colombia
2014

Estudio del potencial biomásico forestal arbóreo en la generación de bioenergía para zonas no interconectadas del valle del cauca y caldas utilizando sensores remotos

José Wilson Murillo Lozano

Tesis de investigación presentada como requisito parcial para optar al título de:

Magister en Ingeniería Ambiental

Director:

Ph.D. Andrés Felipe Rojas González

Codirectores:

Ph.D., Carlos Humberto Mora Bejarano

Ph.D., John Josephraj Selvaraj

Línea de Investigación:

Manejo y Aprovechamiento de Residuos

Grupo de Investigación:

Prospectiva Ambiental

Universidad Nacional de Colombia
Facultad de Ingeniería y Administración
Escuela de Posgrado
Palmira, Colombia

2014

(Dedicatoria o lema)

A Dios, por darme la fortaleza y la sabiduría para sacar adelante mi proyecto

A mi esposa Yakeline y mi hija Nicoll Anyelinne, por su apoyo y comprensión y por ser mi fuente de inspiración y aliento

A mi familia, por el apoyo y la fortuna de contar con ellos a lo largo de mi vida

A mis Directores, por su dedicación

A mis compañeros y amigos, por la fortuna de contar con ellos

Agradecimientos

A los Profesores Andrés Felipe Rojas González, Carlos Humberto Mora Bejarano y John Josephraj Selvaraj, por sus valiosos aportes y orientación profesional.

A la Profesora Ana Cecilia Agudelo Henao, por su orientación profesional y por ser fuente de motivación durante el desarrollo de este proyecto.

A la Ingeniera Adriana Martínez Arias por su apoyo incondicional y sus valiosos aportes.

A mi compañero José Raniere Correa de la biblioteca por su colaboración y apoyo.

Resumen

El planteamiento de estrategias de aprovechamiento de residuos para la generación de fuentes renovables de energía, amigables con el medio ambiente, es uno de los desafíos que enfrenta actualmente la comunidad académica. Residuos de biomasa de procesos naturales y agroindustriales, tales como los residuos forestales obtenidos en las podas de árboles, la limpieza y el mantenimiento de bosques, parques naturales, patios, jardines y procesos artesanales aportan un contenido energético que puede ser aprovechado en la generación de energía en zonas no interconectadas al sistema eléctrico nacional. Con el fin de evitar incursiones en los bosques, de tipo invasivo y destructivo, en este trabajo se utilizó el sensor MODIS TERRA para obtener imágenes satelitales, a partir de las cuales se obtiene información de la biomasa forestal de los departamentos caso de estudio. El producto MOD44Bse utilizó para obtener la proporción de arbolado por pixel para las zonas continuas de bosques. Para el cálculo del índice de vegetación se utilizó el producto MOD13Q1. Se empleó el análisis exergético para la cuantificación de la biomasa superficial forestal en los departamentos del Valle del Cauca y Caldas. Posteriormente se calculó el potencial energético de la biomasa forestal de los departamentos en estudio con el fin de analizar la viabilidad de su uso como combustible para la generación de bioenergía en zonas no interconectadas al sistema eléctrico nacional de estos departamentos. A partir de estos datos se calculó el total de biomasa forestal, la cual dio un promedio de 846290,44 ton y 342235,08 ton para los departamentos del Valle del Cauca y Caldas, respectivamente. El potencial energético promedio asociado a la biomasa forestal fue de 21,47 kJ/kg equivalente a 5,938 W/h. Este potencial energético podría ser aprovechado para la obtención de bioenergía en zonas de estos departamentos que no están conectadas al sistema eléctrico nacional. Fue así como se propuso que las plantas de bioenergía en el departamento del Valle del Cauca podrían estar ubicadas en Guamia, Sabanazo, La delfina, Bazán, Totoro y Manzanillo. Para el departamento de Caldas las plantas de bioenergía podrían estar ubicadas en Varsovia, El Jardín, Alejandría, Sausagua y La Secreta. Con ello se plantea la posibilidad de generación de energía eléctrica sin

X Estudio del potencial biomásico forestal arbóreo en la generación de bioenergía para zonas no interconectadas del valle del cauca y caldas utilizando sensores remotos

ocasionar impactos ambientales negativos a corto, mediano o largo plazo, lo que podría redundar en promover un desarrollo social, económico y cultural en dichas regiones.

Palabras clave: Biomasa, Imágenes de Resolución Moderada Espectro Radiométricas, Índice de Vegetación Mejorado, Índice de Fracción Vegetal, Zonas No Interconectadas, Bioenergía.

Abstract

The use of waste for the generation of renewable energy sources, friendly to the environment, is one of the challenges facing the academic community. Biomass residues, from natural and agro industrial sources, such as forest residues obtained from pruning trees, cleaning and maintenance of forest, parks, gardens and craft processes, can provide an energy content that can be exploited in the generation of energy in areas not connected to the national grid. In this work MODIS TERRA sensor allowed to obtain satellite images that provide information of forest biomass for the departments of Valle del Cauca and Caldas, in order to avoid invasive and destructive interactions with the forest areas. The MOD44B product was used to calculate the proportion of trees per pixel for continuous forest areas. Vegetation index was calculated using MOD13Q1 product. Exergy analysis was used for the quantification of forest aboveground biomass in the departments of Valle del Cauca and Caldas. Subsequently, the energetic potential of forest biomass was calculated in order to analyze its possible use as a fuel for the generation of bioenergy in areas not connected to the electric national system in these departments. Total forest biomass was 846,290.44 tons and 342,235.08 tons for the Valle del Cauca and Caldas, respectively. The average potential energetic associated with forest biomass was 21.47 kJ/kg equivalent 5,938 W/h. Taking into account that these are high values of energy, which could be used to produce bioenergy, it was proposed that Guamia and Sabanazo, La delfina, Bazán, Totoro and Manzanillo in the department of Valle del Cauca, are adequate places to locate energy plants. For the department of Caldas, bioenergy plants could be located in Varsovia, El Jardín, Alejandría, Sausagua and La Secreta. These results shows the possibility of generating electricity without causing negative environmental impacts, which could lead to promoting social, economic and cultural development in these regions.

Keywords: Biomass, Moderate-resolution Imaging Spectroradiometer, Vegetation index, Vegetal Fraction Index, non-interconnected zones, Bioenergy

Contenido

	Pág.
Resumen.....	IX
Abstract.....	XI
Lista de figuras.....	XVI
Lista de tablas.....	XVII
Lista de Símbolos y abreviaturas.....	XVIII
Introducción.....	1
1. Soporte Conceptual	7
1.1 Biomasa forestal	7
1.1.1 Potencial de Biomasa	8
1.1.2 Dosel Arbóreo.....	8
1.1.3 Costo de Distancia.....	8
1.1.4 Índices de Vegetación.....	9
1.2 Sensores Remotos.....	10
1.2.1 Sensor MODIS.....	12
1.2.2 Resolución.....	13
1.3 Sistema de Información Geográfica (SIG)	13
1.3.1 Software ArcGIS	15
1.3.1.1 ArcGIS ArcView	15
1.4 Energía y Exergía.....	17
1.4.1 Definiciones	17
1.4.2 Análisis próximo y elemental.....	19
1.4.3 Poder calorífico.....	20
1.4.4 Correlaciones para determinar la exergía química.....	21
1.5 Plantas de Generación de Bioenergía	23
1.5.1 Definición.....	23
1.5.2 Tipos de Plantas de Generación de Energía.....	24
1.5.2.1 Plantas Térmicas	25
1.5.2.2 Plantas Solares.....	25
1.5.2.3 Plantas Hidráulicas	25
1.5.2.4 Plantas Eólicas	26
1.5.2.5 Plantas Geotermales.....	26
1.5.3 Bioenergía	26
1.5.4 Fuentes Generadoras de Energía en Colombia	26
1.5.4.1 Hidroelectricidad	26
1.5.4.2 Centrales térmicas a gas	27
1.5.4.2.1 Centrales térmicas a carbón.....	28
1.5.4.2.2 Centrales térmicas a diesel o fuel oil	28
1.5.4.3 Energía Eólica.....	29

▪	1.5.4.4 Energía Solar.....	29
▪	1.5.4.5 Energía Geotérmica.....	30
1.6	Tipos de Zonas de Interconexión Eléctrica.....	30
1.6.1	Zonas No Interconectadas – ZNI.....	31
▪	1.6.1.2 Zonas Aisladas - ZA.....	31
▪	1.6.1.3 Zonas Interconectadas - ZI.....	31
2.	Materiales y Métodos.....	33
2.1	Etapa 1: Recolección de información básica.....	34
2.2	Etapa 2: Obtención y procesamiento de imágenes.....	34
2.3	Etapa 3: Cálculo de EVI y VCF.....	35
2.3.1	Cálculo de EVI.....	35
2.3.2	Cálculo de VCF y biomasa superficial forestal arbórea.....	37
2.3.3	Determinación de la Biomasa.....	39
2.4	Etapa 4: Elaboración de mapas de biomasa superficial forestal arbórea.....	39
2.5	Etapa 5: Cálculo de la energía y la exergía de la biomasa superficial forestal arbórea.....	40
2.5.1	Energía de la biomasa: Poder calorífico.....	42
2.5.2	Exergía química de la biomasa.....	43
2.6	Etapa 6: Identificación y ubicación de las zonas no interconectadas.....	44
2.7	Etapa 7: Posible ubicación de plantas de generación de bioenergía.....	47
3.	Resultados y Discusión.....	49
3.1	Biomasa forestal arbórea.....	49
3.2	Cuantificación general de la energía y exergía de la biomasa superficial forestal arbórea.....	51
3.3	Identificación y ubicación de las zonas no interconectadas.....	52
3.4	Posible ubicación de plantas de generación de bioenergía.....	54
4.	Conclusiones y Recomendaciones.....	57
4.1	Conclusiones.....	57
4.2	Recomendaciones.....	58
	Anexo A.....	59
	Anexo B.....	61
	Bibliografía.....	63

Lista de figuras

	Pág.
Figura 2-1: Área de Estudio	34
Figura 2-2: Promedio de EVI para el I semestre de 2013 para los departamentos del Valle del Cauca y Caldas	36
Figura 2-3: Variación del EVI para los departamentos del Valle del Cauca y Caldas para el primer semestre de 2013.....	37
Figura 2-4: Mapa de fracción vegetal para el año 2010 para los departamentos del Valle de Cauca y Caldas	38
Figura 2-5: Diagrama de flujo de la metodología empleada en este estudio	48
Figura 3-1: Distribución espacial de valores promedio de biomasa para los departamentos del Valle del Cauca y Caldas	50
Figura 3-2: Mapa ZNI del departamento del Valle del Cauca.....	52
Figura 3-3: Mapa ZNI del departamento de Caldas	53
Figura 3-4: Mapa de costo de distancia y posible ubicación de centros de acopio del departamento del Valle del Cauca.....	55
Figura 3-5: Mapa de costo de distancia y posible ubicación de centros de acopio del departamento de Caldas de	56

Lista de tablas

	Pág.
Tabla 1-1: Características del sensor MODIS.....	13
Tabla 1-2: Diferencias entre energía y exergía [Cengelet al., 2002; Miranda et al., 2009].	18
Tabla 2-1: Proporción porcentual, de cada tipo de biomasa en las mezclas.	41
Tabla 2-2: Análisis próximo y elemental de la biomasa [Nhuchhen y Salam, 2012; Miranda et al., 2009].	42
Tabla 2-3: Poder calorífico superior e inferior de algunas especies de biomasa.	43
Tabla 2-4: Exergía química de algunas especies de biomasa.	44
Tabla 2-5: Centros poblados no susceptibles de interconexión eléctrica del departamento del Valle del Cauca con mayores valores de biomasa.	45
Tabla 2-6: Centros poblados no susceptibles de interconexión eléctrica del departamento de Caldas con mayores valores de biomasa.	46

Lista de Símbolos y abreviaturas

Abreviaturas

Abreviatura	Término
AC	Corriente alterna
B _{fa}	Biomasa Forestal Arbórea
CF	Carbono Fijo
CO ₂	Dióxido de Carbono
C _z	Ceniza
DC	Corriente directa
EOS	<i>Earth Observation System</i>
EVI	Índice de Vegetación Mejorado
GEI	Gases de Efecto Invernadero
GIS	<i>Geografic Information System</i>
kWp	Kilowattios de potencia
MODIS	Imágenes de Resolución Moderada Espectro Radiométricas
Mol	moles
MV	Materia Volátil
MW	Megawattios
NDVI	<i>(Normalized Difference Vegetation Index)</i> Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada
PCI	Poder Calorífico Inferior
PCS	Poder Calorífico Superior
PP	Planta de Potencia
SI	Sistema Internacional
SIG	Sistema de Información Geográfica
T _o	Temperatura
VCF	Índice de Fracción Vegetal
W/h	Wattio-hora
ZA	Zonas Aisladas
ZI	Zonas Interconectadas
ZNI	Zonas No Interconectadas
ε _{qm}	Exergía química

Introducción

Uno de los desafíos que enfrenta actualmente la humanidad es la necesidad de sustituir los combustibles fósiles por fuentes renovables de energía. Fuentes alternativas tales como la biomasa y los biocombustibles han mostrado una capacidad interesante de proveer energía, además de ser amigables con el ambiente. Entre las fuentes de biomasa se encuentra los residuos forestales, los cuales son obtenidos en las podas de árboles, limpieza y mantenimiento de bosques, parques naturales, patios y jardines (truncos caídos, ramas, hojas y maleza), en el procesamiento de la madera para su uso en producción de muebles, tableros y papel (aserrín, virutas y astillas). La biomasa producida de los residuos forestales no está siendo utilizada para la producción de bioenergía debido a que no existe suficiente información sobre la cantidad y calidad de estos residuos, a la vez que existen muchas dificultades técnicas para su extracción, manipulación y transporte. Estos residuos podrían ser retirados del bosque puesto que constituyen un riesgo importante en la propagación de plagas, generación de gases de efecto invernadero durante su descomposición y provocan el avance de incendios forestales, y a su vez pueden ser aprovechados para la producción de energía y/o generar vapor al incinerarlos [Andersen *et al.*, 2005].

En los últimos años ha existido una preocupación a nivel mundial por el agotamiento de los combustibles fósiles. Es así como los gobiernos de los países de la Unión Europea han promocionado el uso de energías renovables, una de cuyas principales fuentes es la combustión de la biomasa, considerada ambientalmente amigable con el ecosistema [Protocolo de Kioto, 1997]. Con este hecho se ha incrementado la investigación así como el desarrollo tecnológico relacionado con la evaluación y construcción de plantas de bioenergía [Velázquez-Martí, 2006]. Se presenta a continuación la revisión de algunas de las publicaciones, en orden cronológico, más relevantes en el tema del uso de sensores remotos para determinar la biomasa forestal, así como su posible utilización para la producción de bioenergía.

En Sur América, Paruelo *et al.* (2004) demostraron que las estimaciones de la captura de carbono a escala continental muestran que algunos países se comportan como sumideros de Carbono y otros lo hacen como fuentes de ganancia de carbono. Los mismos investigadores mostraron que el dosel arbóreo que comprende la disposición espacial (distribución y orientación) de la superficie y la forma de los órganos aéreos de los arboles es un estimador confiable de la producción primaria de la vegetación, ya que los datos empíricos apoyan la relación que existe entre el NDVI (The Normalized Difference Vegetation Index o en español Índice de Vegetación de Diferencia Normalizado) y el dosel arbóreo.

En Estados Unidos, Waring *et al.* (2006) implementaron la metodología de los sensores remotos utilizando las imágenes MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer o en español Imágenes de Resolución Moderada Espectro Radiométricas) para predecir la riqueza arbórea de una región. Ellos dividieron en parcelas las ecoregiones, (porciones de tierra con características similares) para medir el EVI, el cual es un buen sustituto para estimar patrones estacionales.

En Colombia, Anaya *et al.* (2008) proponen, para la zona continental aumentar el nivel de detalle de la estimación aérea de biomasa de pastizales, bosques primarios y secundarios para lo cual se utiliza una variable explicativa de la biomasa que es la proporción de arbolado por pixel representados en el producto MOD44 que es (VCF) siguiendo una relación exponencial. Los mismos autores manifiestan que existe dificultad en diferenciar entre las zonas de bosques y los pastizales con los productos empleados en la investigación; por lo que utilizan mapas auxiliares para justificar que las diferencias entre sus resultados con los estudios previos son mínimas.

En España, Alfonso *et al.* (2009) y Perpiña *et al.* (2009) reportaron la evaluación de la logística para cuantificar la biomasa disponible en una región de la comunidad de Valencia, la cual consistió en evaluar, en un área de 1 km², características tales como las propiedades de la biomasa (cantidad, calidad, estacionalidad y disponibilidad), el efecto del tamaño de la planta, las tecnologías disponibles para la energía, el calor y la generación de biocombustibles sólidos, las emisiones de equilibrio, el CO₂ y la cuantificación del consumo potencial de biocombustibles, con el fin de establecer qué tipo de planta se podría

implementar teniendo en cuenta los análisis técnicos, económicos y ambientales, detallando los diferentes usos de la energía de la biomasa.

En Italia, Beccali *et al.* (2009) reportaron la implementación del uso de los sensores remotos para evaluar el potencial técnico y económico de explotación de biomasa en la producción de energía. La metodología consistió en evaluar los datos agrícolas, económicos, climáticos y de infraestructura existentes contenidos en un SIG. Con ese análisis se logró demostrar la fuerte competitividad que tiene la biomasa forestal comparada con los combustibles fósiles tradicionales.

En Croacia, Cosic *et al.* (2010) determinaron el potencial energético de la biomasa usando metodologías desarrolladas para paja de trigo, rastrojo de maíz y residuos forestales. En la metodología se utilizó un análisis regional del potencial de energía de biomasa, se evaluó el costo de la biomasa en la ubicación de la planta de potencia (PP) teniendo en cuenta la distancia de transporte, costos de transporte y tamaño de las centrales eléctricas, encontrándose que estos residuos tienen un potencial que los hace económicamente viables para la producción de energía.

En Cuba, Andrade *et al.* (2009) definieron la metodología del aprovechamiento energético de biomasa para identificación, cuantificación y caracterización previa con fines energéticos, la cual incluye análisis de dispersión y estacionalidad, logística, transporte y factores socioeconómicos, con el fin de evaluar la ubicación de plantas bioenergéticas realizando validación de las mejores tecnologías de transformación con la implementación de un SIG.

Dimakis *et al.* (2010) manifestó que en declaraciones hechas por EE.UU y la comunidad europea se plantea el uso de energías renovables para combatir el creciente Cambio Climático debido a las concentraciones en la atmósfera de dióxido de carbono y entre ellas se encuentra la biomasa y proponen herramientas tales como la geo estadística y los sensores remotos, con el fin de estudiar su distribución espacial y su potencial energético, los cuales se pueden complementar con el uso los SIG para contabilizar los datos del proceso y demostrar los impactos locales.

Los estudios anteriores permiten establecer la importancia del uso de sensores remotos. Aunque se han hecho algunos esfuerzos, este tema se ha explorado poco en Colombia. Por tal razón, en este trabajo se propuso la utilización de tecnologías satelitales para cuantificar la biomasa forestal superficial en los departamentos del Valle del Cauca y Caldas, y que a futuro se podrá extender a otros departamentos.

Colombia es un país con un gran potencial de recursos residuales resultantes del aprovechamiento procesos tales como podas, aserrado de madera (los residuos resultantes de este proceso alcanza el 75% del volumen de la producción) [López, 2013], y otras actividades surgidas del devenir industrial y artesanal que podrían ser utilizados en la producción de bioenergía. Por otro lado, el sector eléctrico en Colombia, en el que prima la generación de energía hidráulica (64% de la producción) y generación térmica (33%), no logra satisfacer los requerimientos energéticos de grandes zonas que actualmente no están conectadas a redes eléctricas y que surten sus necesidades a través de plantas diésel generadoras de energía. La obtención de energía a partir de los residuos de biomasa forestal puede contribuir de manera esencial a satisfacer dicha necesidad y favorecer la sostenibilidad del medio ambiente evitando emisiones de tipo invernadero que incrementan el cambio climático. Esto se logra reduciendo gran parte de la descomposición de la biomasa en la naturaleza, disminuyendo principalmente las emisiones de CO₂, producto de la respiración de los microorganismos aerobios degradadores de biomasa, y de metano generado por la descomposición de los restos forestales por los microorganismos anaerobios.

Adicionalmente a lo anterior, el poco aprovechamiento de elementos y materiales residuales, sumados al desconocimiento y poco interés del uso de estos recursos como insumos para nuevos procesos, establecen la problemática que actualmente experimenta no solamente Colombia, sino todos los países; sin profundizar en los problemas de interconexión eléctrica que tienen los países latinoamericanos, en las llamadas Zonas No Interconectadas (ZNI).

La generación de energía eléctrica en la mayoría de las ZNI provienen de la utilización de combustibles fósiles que generan altos costos e impactos al medio ambiente, tales como gases de efecto invernadero (GEI). En estas zonas habitan 1.3 millones de habitantes, lo cual representan un 2,7% de la población total del país que no cuenta con una cobertura

eléctrica. El sistema eléctrico Colombiano tiene una capacidad instalada de 170 MW, lo que no es suficiente para satisfacer la necesidad energética, provocando que actualmente le compre energía a Ecuador [UPME, 2013]. Esto manifiesta la necesidad de tener alternativas de solución para la generación de energía, debido a que el país no cuenta con las instalaciones necesarias para generar la energía que realmente necesita, y para llevar energía a las ZNI que no cuentan con plantas generadoras de energía que emplean combustibles fósiles.

La solución a esto se plantea a través del aprovechamiento de los residuos forestales, convirtiéndolos en una alternativa de solución a los problemas energéticos y ambientales de nuestro país, que a la vez pueden redundar en ser fuentes de ingresos y recursos para las regiones y sus pobladores. En el marco legal, se cuenta con la ley de 2001, la cual fue diseñada para promover el uso de energías alternas. Sin embargo, no se definen estrategias claves para lograr este objetivo a cabalidad [García-Santander, 2010], dado que la distribución heterogénea de la biomasa en nuestro territorio, dificulta su aprovechamiento en forma óptima y eficiente [Hernández, 2001]. Es por ello que es necesario realizar un estudio de distribución de biomasa a través de mapas de densidad superficial de biomasa forestal empleando los Sensores Remotos y Sistemas de Información Geográfica – SIG, análisis de logística y factores socioeconómicos, para la posible ubicación de una planta de generación de bioenergía y/o centros de acopio de la biomasa. Y de esta manera reducir costos en transporte y tiempos de acceso a la bioenergía en las ZNI. La implementación de una central de generación de energía en una ZNI, traerá beneficios ecológicos, económicos y sociales a estas comunidades, porque a través de la disponibilidad de energía eléctrica, es posible desarrollar la agroindustria, microempresas, acceso a formación académica y mayor calidad de vida de la comunidad. Todo esto repercutirá en generación de nuevos empleos.

Este trabajo tiene como objetivo general determinar el potencial energético de los recursos forestales de los departamentos del Valle del Cauca y Caldas, empleando sensores remotos y una cuantificación energética y exergética, con el fin de establecer la ubicación óptima de una planta de generación de bioenergía para suministrar electricidad a una ZNI de los departamentos. Este alcance global de la investigación se soporta por medio de la elaboración de un mapa de densidad superficial de biomasa forestal arbórea, la determinación del potencial energético de los residuos disponible a través de su evaluación

energética y exergética, la construcción un mapa de las ZNI, los centros de acopio de biomasa y el análisis de factibilidad para la posible ubicación de una planta de generación de bioenergía, en los departamentos del Valle del Cauca y Caldas.

El presente documento se encuentra estructurado de la siguiente manera: El capítulo 1 contiene el soporte conceptual y la revisión bibliográfica. En el capítulo 2 se presenta el proceso metodológico utilizado para alcanzar los objetivos del trabajo. En el capítulo 3 se muestran los principales resultados y su respectiva discusión. El capítulo 4 describe los hallazgos más relevantes del trabajo y se plantean algunas perspectivas de trabajos futuros. Finalmente, se anexan algunos mapas y figuras importantes para comprensión del texto.

1. Soporte Conceptual

Como el estudio en referencia trata la cuantificación de la biomasa superficial arbórea a continuación se mencionan conceptos y definiciones que nos ayuden a entender este propósito.

1.1 Biomasa forestal

La biomasa forestal arbórea se define como el peso (o la estimación equivalente) de materia orgánica que se encuentra en un ecosistema forestal por encima y por debajo del suelo. Normalmente se cuantifica en toneladas por hectárea de peso verde o seco. Para su manipulación y procesamiento de pesaje es frecuente separarla en sus componentes, donde encontramos la masa del fuste, ramas, hojas, corteza, raíces, hojarasca y madera muerta [Rügnitz *et al.*, 2009]. La determinación adecuada de la biomasa de un bosque, es de gran importancia debido a que ésta permite determinar los montos de carbono y los elementos químicos existentes en cada uno de sus componentes. Esta información es de gran importancia en la actualidad, debido a la necesidad de encontrar fuentes alternativas de biocombustibles, amigables con el medio ambiente que contribuyan a mitigar el cambio climático generado por el consumo de combustibles fósiles, que liberan una gran cantidad de dióxido de carbono a la atmósfera [Schlegel *et al.*, 2000].

En una investigación de tipo exploratoria, como la presente, que consta de un área de estudio extensa y poco accesible, es necesario que la estimación de biomasa forestal arbórea superficial no incurriese en costos elevados, tal como los que exigen estudios detallados a pequeña escala mediante cosechas destructivas en el terreno, en donde a causa de la elevada intensidad de trabajo, el tamaño y el número de parcelas o unidades de muestras a medir tendrían que ser reducidas. Hay que tener en cuenta que los estudios de biomasa a partir de mediciones de un pequeño número de parcelas en el terreno pueden difícilmente lograr cubrir la heterogeneidad típica de los bosques húmedos

tropicales. Además, se presentan limitaciones en cuanto a su aplicación extensiva a otras localidades, más aún si se pretende extrapolar a grandes superficies [Hernández, 2001].

Otra opción, consiste en una estimación de biomasa de tipo indirecto a partir de una base de datos digitales a gran escala, alimentada por información preexistente generada por diferentes sensores remotos que monitorean constantemente los bosques localizados en la zona de estudio [Francois *et al.*, 2011].

A continuación se mencionan algunas características que pueden ayudar a entender el estudio adecuado de la estimación de la biomasa y la comprensión de algunos parámetros utilizados para este fin.

1.1.1 Potencial de Biomasa

El potencial de biomasa es la cantidad de recursos forestales de biomasa disponibles con que cuenta un territorio para ser empleada en la obtención de calor y electricidad. Entre las principales fuentes de biomasa forestal como combustible se tienen los productos resultante del raleo, plantaciones energéticas y potencial maderable no utilizado del manejo de los bosques y plantaciones existentes. En la actualidad, los bosques y sus residuos forestales, así como los residuos del procesamiento de la madera, constituye un recurso aprovechable con fines energéticos. Aspecto que toma en cuenta, los altos costos del petróleo como combustible fósil y las grandes emisiones proporcionadas por tecnologías consumidoras por este tipo de combustible. Para el 2009 el consumo tradicional de madera como combustible a nivel mundial asciende a 1,777 millones de metros cúbicos equivalentes a 600 millones de toneladas de combustible fósil [Andrade *et al.*, 2009].

1.1.2 Dosel Arbóreo

Dosel arbóreo o forestal arbóreo también llamado en ocasiones canopía o canopeo, comprende la disposición espacial (distribución y orientación) de la superficie y la forma de los órganos aéreos de los árboles, la estructura es dinámica y cambia a escalas de tiempo que puede ser desde minutos hasta años [Marcos *et al.*, 2008; Promis y Cruz, 2009].

1.1.3 Costo de Distancia

El costo de distancia que para su cálculo se utiliza una herramienta del Spatial Analyst de ArcGIS sirve para realizar el análisis del costo del transporte de la biomasa evaluando en

tiempo, distancia y biomasa transportada. La herramienta calcula la distancia de menor costo acumulativo para cada sitio de origen más cercano sobre una superficie [www.esri.com; Peña, 2006].

1.1.4 Índices de Vegetación

Los índices de vegetación nos permiten estimar la abundancia de vegetación utilizando datos espectrales, cuya función es realzar la contribución de la vegetación en la respuesta espectral de una superficie, y atenuar la de otros factores como el suelo, las condiciones de iluminación y la atmosfera [Carvacho y Sánchez, 2010]. Los índices de vegetación más simple que se han utilizado son la respuesta espectral en ciertas bandas.

En este trabajo se utilizaron los siguientes índices el EVI (*Enhanced Vegetation Index* o en español Índice de Vegetación Mejorado), representado en el producto MOD13Q1 y el VCF (*Vegetation Continuous Fields* o en español Campos Continuos de Vegetación), representado en el producto MOD44B. Para estimar el comportamiento de la biomasa forestal arbórea en los sitios de estudio, debido al gran aporte que representan en investigaciones de este tipo.

El índice global de vegetación MODIS, se ha diseñado para proporcionar comparaciones espaciales y temporales consistentes con el estado de la vegetación. Azul, Rojo, y reflectancias en el infrarrojo cercano, centradas a 469 nanómetros, 645 nanómetros, y 858 nanómetros, respectivamente, se utilizan para determinar los índices de vegetación diarios MODIS [Waring *et al.*, 2006; Argote *et al.*, 2011].

El EVI minimiza el dosel con variaciones de fondo y mantiene la sensibilidad sobre las condiciones de una vegetación muy densa. El EVI utiliza la banda azul para eliminar las contaminaciones atmosféricas residuales causadas por el humo y los sub-píxeles de las nubes delgadas, este índice se calcula a partir de la reflectancias de superficies bidireccionales corregidas atmosféricamente que han sido enmarcadas por el agua, las nubes, los aerosoles pesados y sombras de nubes [<http://lpdaac.usgs.gov>; Waring *et al.*, 2006].

El VCF está compuesto por tres bandas que representan tres componentes de la cubierta de la superficie: porcentaje de cobertura arbórea, porcentaje de cubierta no arbórea y porcentaje de suelos desnudos. El porcentaje de la cubierta arbórea, presenta en cada

píxel el porcentaje correspondiente a la cobertura vegetal de árboles. Representado en la imagen con valores de 0 a 100, siendo 100 un píxel con cobertura total de árboles y cero la ausencia de árboles en dicho píxel. En este trabajo se usará la sigla VCF para denotar el componente correspondiente a la cubierta arbórea. El VCF es tomado del producto MOD44B [<http://lpdaac.usgs.gov>; Anaya *et al.*, 2008].

Para poder estudiar de manera adecuada estos índices se hace necesario conocer sobre los sensores remotos que se mencionan a continuación.

1.2 Sensores Remotos

Sensores Remotos o teledetección es la ciencia y arte de obtener información de la superficie o de objetos, áreas, o fenómenos, de forma remota utilizando sistemas de registro situados en satélites o aviones que no están en contacto con la superficie o el objeto, área, o fenómeno bajo investigación. (Paruelo, 2008) expone “La lectura por ejemplo es un proceso en el cual se usan los sensores remotos, ya que los ojos actúan como sensores de luz reflejada desde una página, y permiten el reconocimiento de las palabras”.

Normalmente el término sensores remotos se utiliza para designar el estudio que se realiza con sensores de energía electromagnética que corrientemente operan desde aeronaves y plataformas espaciales, y que están realizando permanentemente inventarios, mapeando y monitoreando los recurso de la Tierra.

Aquí se observa que la aero-fotogrametría también debe ser incluida en la definición puesto que es un sistema de registro de energía electromagnética. El término sensores remotos se ha generalizado para aquellos sistemas que registran energía en un amplio rango de longitudes de onda [Lillesand *et al.*, 2007]. Teniendo en cuenta que la información es:

- Global, abarcando grandes áreas con buena resolución espacial
- Objetiva, pues se recoge mediante sensores calibrados
- Periódica, pues se recoge incluso varias veces al día
- Digital, por tanto, susceptible de tratamiento informático

Seguidamente mencionaremos como están constituidos dichos sensores.

Según Chuvieco (2000), un sistema de teledetección espacial se compone de los siguientes elementos:

1. Fuente de energía, que supone el origen de la radiación electro-magnética que detecta el sensor
2. Cubierta terrestre
3. Sistema sensor (sensor-plataforma)
4. Sistema de percepción-comercialización
5. Intérprete, que convierte los datos en información de interés
6. Usuario final

Los sensores se dividen o clasifican en:

Si el sensor detecta la energía reflejada o emitida por los objetos, los cuales a su vez fueron iluminados por la fuente natural de energía que es el sol, llamamos al sensor *pasivo*. La mayoría de los sensores remotos puestos en órbita, tales como SPOT, Landsat, IKONOS, MODIS TERRA, IRS, SAC-C, Tiros (1960, meteorológico), Mariner IV (1965), Nimbus-7 [Lillesand *et al.*, 2007], son sensores pasivos. Si el sensor tiene que "iluminar" los objetos mediante la emisión de una energía propia entonces el sensor se denomina *activo*. Entre estos sistemas de detección está el radar aéreo transportado que fue desarrollado con fines militares en 1950 y luego fue desclasificado para uso civil con aplicaciones a los recursos naturales [Lillesand *et al.*, 2007].

Entre las aplicaciones de los Sensores Remotos según [Lillesand *et al.*, 2007] tenemos las siguientes:

- *Estudio del medio ambiente general.*
- *Análisis de impacto ambiental:* consecuencias de las obras de arquitectura hechas por el hombre, emplazamiento de industrias contaminantes.
- *Geología:* estudio de depósitos minerales y petrolíferos, dinámica de la estructura terrestre y actividad volcánica.

- *Hidrológica*: estudio de la contaminación de las aguas y material de arrastre, análisis de los cursos de agua y peligros de inundaciones, localización de fuentes de agua potable, detección y seguimiento de hielos y témpanos, cartografía térmica del mar.
- *Estudio y cartografía de la vegetación*: producción y distribución de las especies agrícolas y forestales, estudio del suelo fértil, detección de plagas e insectos que afectan la producción agrícola, análisis de zonas con sequías.
- *Cartografía de áreas afectadas por incendios forestales*.
- *Geografía y Cartografía de base*: actualización de catastro rural y urbano a escalas posibles, utilización de las tierras, distribución de la población y sus cambios.
- *Aplicaciones militares*: detección de la capacidad militar de las naciones incluido el espacio exterior, reconocimiento fotográfico y electrónico, detección de ICBM, guerra electrónica.
- *Estudios estratégicos desde el punto de vista geopolítico*: toma de decisiones en base a información y datos como entidades georeferenciadas.
- *Construcción de modelos digitales del terreno en áreas inaccesibles*: los DEM como ayuda a la navegación aérea, elección de rutas y caminos en zonas de difícil acceso o selváticas.

A continuación se menciona el sensor MODIS TERRA el cual fue utilizado para este estudio.

1.2.1 Sensor MODIS

El sensor MODIS se encuentra a bordo de los satélites Terra y Aqua los cuales forman parte de la misión EOS (Earth Observing System o en español Sistema de observación de la tierra) de la NASA (National Aeronautics and Space Administration o en español Administración Nacional de la Aeronáutica y del Espacio). El satélite Terra, el cual fue lanzado el 18/12/1999, es solar polar sincronizado, tiene un nodo descendente de 10:30 ± 15 minutos, está ubicado a una altura nominal de 705 km, con una inclinación de 98,2 ± 0,1 grados y tiene un periodo de 98,8 minutos [Argote *et al.*, 2011; Francois *et al.*, 2011].

1.2.2 Resolución

El número de píxeles que integran un sensor de satélite o de cámara digital, definen su poder de resolución. Es decir, la capacidad de discernir objetos o detalles de un determinado tamaño en las imágenes captadas. A mayor número de píxeles por unidad de superficie, mayor resolución del foto sensor, pero también mayor es el volumen del archivo informático generado. Es lo que se denomina resolución espacial y constituye uno de los tipos de resolución que definen a las imágenes satélites. En la tabla 1.1 se muestran las características principales del sensor MODIS. Una imagen de satélite se caracteriza por las siguientes modalidades de resolución [Paruelo *et al.*, 2004]:

- Resolución espacial, tamaño de pixel.
- Resolución espectral, indica el número y anchura de las regiones del espectro para las cuales capta datos el sensor.
- Resolución radiométrica, número de intervalos de intensidad que pueden captarse en una determinada banda.
- Resolución temporal, tiempo que transcurre entre dos imágenes.

Tabla 1-1: Características del sensor MODIS.

CARACTERÍSTICAS	
Resolución radiométrica	1,2 bits
Resolución espectral	36 bandas (0,4 – 14,4 μm)
Resolución espacial	250m (bandas 1 – 2) 500m (bandas 3 – 7) 1000m (banda 8 – 36)
Tasa de datos	6,1 Mbps (promedio)

A continuación una pequeña introducción sobre los Sistemas de Información Geográfica que es una herramienta adecuada para organización de resultados de este tipo de estudio.

1.3 Sistema de Información Geográfica (SIG)

Los Sistemas de Información Geográfica datan de hace 51 años, concretamente del año 1962, fecha en la que fue diseñado en Canadá el primer sistema de estas características con objeto de inventariar los recursos naturales existentes a escala nacional [Loyola *et al.*, 2002]. Un SIG es un conjunto de hardware, software, información geográfica y personal

capacitado, que tiene como objetivo capturar, gestionar, analizar y desplegar todas las formas de información geográficamente referenciada. Un Sistema de Información Geográfico, SIG (GIS en inglés, *Geografic Information System*), particulariza un conjunto de procedimientos sobre una base de datos no gráfica o descriptiva de objetos del mundo real, que tienen una representación gráfica y que son susceptibles de algún tipo de medición respecto a su tamaño y dimensión relativa a la superficie de la tierra. Aparte de la especificación no gráfica los SIG tienen adicionalmente una base de datos gráfica con información geo referenciada o de tipo espacial, y de alguna forma ligada a la base de datos descriptiva.

La información es considerada geográfica si es medible y tiene localización [www.esri.com; Peña, 2006]. Los SIG, son herramientas informáticas empleadas para agrupar datos sobre recursos y demandas energéticas, de una determinada región de un país, permitiendo el filtrado y la visualización de los datos en forma gráfica. De tal manera que se obtiene un estudio de pre viabilidad con rapidez y de bajo costo, en un ambiente de geo procesamiento informático de datos [Tello *et al.*, 2009]. Igualmente, la logística y las estrategias de transporte se pueden utilizar para localizar una red de plantas de bioenergía en una región determinada, así como bodegas de almacenamiento temporal de biomasa [Perpiñá *et al.*, 2009]. Estas herramientas se han utilizado en varios países para estudio de aprovechamiento energético de sus recursos forestales [Beccali *et al.*, 2009; Andersen *et al.*, 2005].

La mayor utilidad de un sistema de información geográfico está relacionada con la capacidad que éste posee para construir modelos o representaciones del mundo real a partir de una base de datos digital. Esto se logra al aplicar una serie de procedimientos específicos que generan aún más información para el análisis. La construcción de modelos o modelos de simulación como se llaman técnicamente, se convierten en una valiosa herramienta de análisis de fenómenos relacionados con tendencias y así poder establecer los diferentes factores influyentes [Peña, 2006]. Los SIG son utilizados principalmente en:

- Obtener información instantánea y actualizada.
- Apoyo en la fase de diagnóstico.
- Facilidad en el análisis de la información.
- Agilidad en la manipulación de datos.

- Facilidad en las consultas.
- Mayor nivel de procesamiento, integración y calidad de datos.
- Información detallada, confiable y geo-referenciada.
- Eficiencia en la respuesta (rápida, oportuna y confiable).
- Mayor velocidad de acceso a la información tanto espacial, como no espacial.

Para la elaboración de un Sistema de Información Geográfica, una de las herramientas más importante en el mercado es el Software ArcGIS entre otros, para lo cual se realizó una pequeña reseña sobre el software que fue empleado.

1.3.1 Software ArcGIS

ArcGIS es una serie integrada de software de Sistemas de Información Geográfica que trabaja como un motor compilador de información geográfica alfanumérica con bases de datos, gráficas y mapas. Es un software GIS para visualizar, crear, manipular y gestionar información geográfica [Chuvienco, 2000]. La información geográfica corresponde a lugares, direcciones, posiciones en terreno, áreas urbanas y rurales. Esta información es trabajada de manera sistémica, lo que representa una diferencia sustancial a lo relacionado al trabajo con información de planos y mapas, permitiendo explorar, ver y analizar los datos según parámetros, relaciones y tendencias que presentan los datos, teniendo como resultado nuevas capas de información, mapas y nuevas bases de datos. El ámbito de acción de *ArcGIS* va desde el apoyo en la planificación de un negocio en particular, hasta el análisis espacial de enfermedades de una ciudad. Su arquitectura está elaborada de tal manera que sus herramientas entregan sistemas inteligentes de información geográfica [www.esri.com; Peña, 2006].

1.3.1.1 ArcGIS ArcView

Con esta herramienta se puede construir los mapas dinámicos e inteligentes que permiten visualizar patrones, tendencias y singularidades en sus datos. *ArcGIS ArcView* incluye formas fáciles de levantar mapas, formatos predefinidos de mapas y una librería de elementos extensa, que permiten elaborar mapas de calidad y como el usuario lo desee. Los mapas terminados se pueden guardar, imprimir, exportar y ubicar en otros documentos o usos. *ArcGIS ArcView* también permite visualizar sus datos como cartas, informes, con volumen, con gráficas e imágenes, teniendo la posibilidad de editarlos expeditamente [www.esri.com; Peña, 2006].

El software ArcGIS cuenta con extensiones que son muy útiles para la elaboración de un SIG, a continuación van a ser descritas brevemente algunas de ellas:

SpatialAnalyst

ArcGIS Spatial Analyst (Análisis Espacial) suministra un amplio rango de herramientas de modelización y análisis espacial. Utilizándolas podemos [www.esri.com]:

- Crear, buscar, mapear y analizar cualquier dato ráster basado en celdas.
- Llevar a cabo análisis integrados ráster-vector.
- Obtener nueva información a partir de datos que ya tengas en tu organización.
- Buscar información de forma cruzada en varias capas.
- Integrar de forma completa datos ráster basados en celdas con las fuentes tradicionales de datos vectoriales.

Integrado dentro del marco de trabajo del geo procesamiento, *ArcGIS Spatial Analyst* te ofrece un acceso sencillo a múltiples funciones de *Model Builder* (Construcción de Modelos), una herramienta de modelado gráfico. Con las herramientas de *ArcGIS Spatial Analyst* puedes [[Peña, 2006](#)]:

- Encontrar las mejores ubicaciones.
- Calcular el costo acumulado de viajar de un punto a otro.
- Llevar a cabo análisis de uso del suelo.
- Predecir riesgos de incendios.
- Analizar las rutas y corredores de transportes y logística.
- Determinar niveles de polución.
- Estudiar el potencial de erosión de diversas zonas geográficas.
- Llevar a cabo evaluaciones de riesgos.
- Modelizar y visualizar patrones de criminalísticas.

Geostatistical Analyst

ArcGIS Geostatistical Analyst (Análisis Geo estadístico) es una completa suite de modelos y herramientas estadísticos para la exploración de datos y la generación de superficies. Utilizando esta extensión puedes crear superficies de predicción estadísticamente válidas

a partir de un número limitado de datos y mediciones. Con *ArcGIS Geostatistical Analyst* puedes [www.esri.com]:

- Explorar la variabilidad de los datos, relaciones espaciales, buscar por valores inusuales y examinar tendencias globales y locales.
- Hacer uso del análisis multivariable para crear modelos estadísticos óptimos para producir mapas de predicciones, errores de predicciones, cuantiles y probabilidades que mejoran la toma de decisiones.
- Modificar los parámetros de los modelos de forma interactiva y optimizarlos automáticamente utilizando la validación cruzada.
- Determinar localizaciones óptimas para crear o actualizar una red de seguimiento.
- Simular diversos escenarios ambientales a través de todas las consecuencias posibles.

ArcGIS Geostatistical Analyst te ayuda a examinar hechos del mundo real [[Peña, 2006](#)]:

- Datos de análisis atmosféricos.
- Exploración petrolera y de minería.
- Análisis del medio ambiente.
- Agricultura de precisión.
- Estudios de pesca y fauna.

Para poder determinar si el poder energético de la biomasa superficial forestal de las zonas en estudio es conveniente para ser usada como biocombustible se recurrió a una cuantificación energética y exergética para lo cual se mencionan algunos conceptos y definiciones que serán de gran utilidad para su comprensión.

1.4 Energía y Exergía

1.4.1 Definiciones

La energía es todo aquello que puede ser transformado en movimiento, o todo aquello en lo cual el movimiento se transforma. De igual manera se define como la capacidad que tiene un cuerpo para realizar un trabajo, de tal manera que se conserva cuando se transfiere dicha capacidad [[Reklaitis, 1989](#); [Silvestrini, 2000](#)]. La exergía de un sistema es una medida de la desviación del equilibrio termodinámico con el medio ambiente, y representa la capacidad máxima de energía para realizar un trabajo útil, el sistema procede

al equilibrio, con irreversibilidad aumentando su entropía a expensas de la exergía [Prins, 2005]. En la tabla 1.2 se presenta algunas diferencias entre energía y exergía.

Tabla 1-2: Diferencias entre energía y exergía [Cengel *et al.*, 2002; Miranda *et al.*, 2009].

Energía	Exergía
Depende solamente de los parámetros de flujo de materia o de energía, y es independiente de los parámetros de entorno, alrededores o ambiente	Depende tanto de los parámetros de flujo de materia o de energía, como de los parámetros del entorno.
Toma valores diferentes de cero	Es igual a cero (en el equilibrio con el entorno)
Se guía por la primera ley de la termodinámica para todos los procesos	Se guía por la primera ley de la termodinámica para procesos reversibles sólo (en los procesos irreversibles que se destruye parcial o completamente)
Está limitado por la segunda ley de la termodinámica para todos los procesos (incluidos los procesos reversibles)	No está limitada por los procesos reversibles, debido a la segunda ley de la termodinámica.
Es la capacidad para producir el movimiento	Es la capacidad para producir trabajo
Se conserva siempre en un proceso, por lo que tampoco se puede destruir o producido.	Siempre se conserva en un proceso reversible, pero siempre se consume en un proceso irreversible.
Es una medida de la cantidad de la capacidad para producir movimiento	Es una medida de la cantidad y calidad debido a la entropía, de la capacidad de producir trabajo
Para vacío ideal es igual a cero	Para vacío ideal es positivo
En caso de gas ideal no depende de la presión	Siempre depende de la presión
Puede ser calculada sobre la base de cualquier estado de referencia	El estado de referencia esta impuesto por el ambiente, el cual puede variar
Se incrementa con un aumento en la temperatura	Para procesos isobáricos alcanza un mínimo a la temperatura del ambiente; a temperaturas más bajas se incrementa con la caída de la temperatura

La exergía generalmente se clasifica en exergía química y exergía física, la suma de estos dos tipos de exergía es la exergía total. A continuación se presenta la definición de estos dos tipos de exergía. La exergía química de una corriente de materia depende de su composición química. La exergía química estándar de un compuesto químico puro es igual a la cantidad máxima de trabajo que se puede obtener cuando un compuesto se lleva desde el estado del medio ambiente, que se caracteriza por la temperatura y presión ambiental, al estado muerto, caracterizado por las mismas condiciones ambientales de temperatura y presión, pero también por la concentración de las sustancias de referencia en el ambiente estándar. Mientras que la exergía física depende de su temperatura y su presión [Prins, 2005].

1.4.2 Análisis próximo y elemental

El análisis próximo es frecuentemente el método más utilizado para la caracterización de combustibles fósiles y biocombustibles. Y se define como el método para determinar el contenido de humedad, ceniza y materia volátil del biocombustible. El carbono fijo se calcula utilizando una ecuación empírica basado en los porcentajes de ceniza y de materia volátil, en base seca, de los datos experimentales [García *et al.*, 2012].

$$CF = 100 - MV - Cz \quad (1.1)$$

Donde CF es el contenido de carbono fijo, MV de materia volátil y Cz de ceniza, todos en porcentaje másico en base seca. El análisis próximo se determina empleando la metodología establecida por la ASTM. Para el contenido de humedad por la norma ASTM E871, para el contenido de ceniza la ASTM E1755 y para la materia volátil la ASTM D3175.

En el análisis elemental o análisis último se determina el contenido de carbono C , hidrógeno H , nitrógeno N y azufre S . El contenido de oxígeno O se calcula como la diferencia de 100% y los porcentajes másicos en base seca de los anteriores elementos [García *et al.*, 2012].

$$O = 100 - C - H - N - S \quad (1.2)$$

El contenido de azufre total se determina utilizando el método descrito en la norma ASTM E775, el contenido de hidrógeno y carbono con la norma ASTM E777, y el contenido de nitrógeno con la ASTM E778.

1.4.3 Poder calorífico

El poder calorífico de cualquier combustible es la energía liberada por unidad de masa o por unidad de volumen del combustible cuando este se quema completamente [Da Silva *et al.*, 2012]. Las unidades típicas para expresar el poder calorífico son MJ / kg en unidades del SI o Btu / lb en unidades inglesas. El poder calorífico de un combustible depende de la consideración hecha sobre la condición física de las moléculas de agua al final en los productos de combustión. Se habla de poder calorífico superior (*PCS*) cuando se considera que el agua se condensa en los productos finales de la combustión. En este valor está incluido el calor sensible y el calor latente del agua. Cuando se asume que el agua está en forma de vapor en los productos de combustión, se habla de poder calorífico inferior (*PCI*), por lo tanto el calor latente no se contabiliza. El análisis para determinar el poder calorífico de biomasa se realiza bajo la norma ASTM E711. Sin embargo, actualmente este parámetro se puede determinar a partir de relaciones empíricas que se encuentra en función del análisis próximo o en función del análisis último [Saudiret *et al.*, 2011; Yin, 2010].

Estas ecuaciones son establecidas mediante datos experimentales a partir de combustibles fósiles a biomasa [Abuadala y Dincer, 2010] o a partir de biomasa [Yin, 2010]. Dos de estas correlaciones más utilizadas se presentan a continuación [Karamarkovic y Karamarkovic, 2010; Yin, 2010]:

$$PCS = 0.3491 C + 1.1783 H + 0.1005 S - 0.1034 O - 0.0151 N - 0.0211 Cz \quad (1.3)$$

$$PCS = 0.3536 CF + 0.1559 MV - 0.0078 Cz \quad (1.4)$$

En estas ecuaciones, el PCS está dado en unidades de MJ/kg, y el contenido elemental o próximo está en porcentaje en peso en base seca.

1.4.4 Correlaciones para determinar la exergía química

La exergía química de las sustancias depende de su estado de agregación.

Para mezclas gaseosas, la exergía química de una mezcla gaseosa está determinada por la composición y la concentración de los componentes en la mezcla.

$$\varepsilon_{q,m} = \sum_{i=1}^S x_i \varepsilon_{qi} + RT_0 \sum_{i=1}^S x_i \ln x_i \quad (1.5)$$

Donde $\varepsilon_{q,m}$ es la exergía química de la mezcla, x_i es la fracción molar del componente i en la mezcla, ε_{qi} es la exergía química del componente i , R es la constante de los gases (8,314 J/mol K), y T_0 es la temperatura estándar (273.15K) En esta ecuación se observa que la exergía química de la mezcla es siempre menor que la suma de la exergía de los componentes individuales [Prins, 2005].

Para sólidos, (Shieh y Fan) proponen la siguiente correlación para determinar la exergía química [Saidur et al., 2012; Song et al., 2012]:

$$\varepsilon_{qS} = 4,1868\{8177,79C + 5,25N + 27,892H - 3173,66O + 0,150(7837,67C + 33888,89H - 4236,10)\} \quad (1.6)$$

$$\varepsilon_{qS} = 362,008C + 1101,841H - 86,218O + 2,418N + 196,701S - 21,10Cz \quad (1.7)$$

Para combustibles líquidos [Song et al., 2012]:

$$\varepsilon_{qS} = 362,545C + 1078,376H - 91,048O - 10,94N + 190,41S - 21,10Cz \quad (1.8)$$

Para combustibles líquidos y sólidos [Song et al., 2012]:

$$\varepsilon_{qS} = 363,439C + 1075,633H - 86,308O + 4,147N + 190,798S - 21,10Cz \quad (1.9)$$

Aquí, C, N, H, O y Cz, son porcentajes máxicos de los elementos carbono, nitrógeno, hidrógeno y oxígeno y de la ceniza, respectivamente, en base seca.

Para biomasa, la exergía química, en kJ/kg, se puede determinar por medio de la correlación estadística propuesta por Szargut y Styrylska (1964) [Prins, 2005; Panopoulos *et al.*, 2006]:

$$\varepsilon_q = \beta PCI \quad (1.10)$$

El poder calorífico inferior (*PCI*), en unidades de MJ/kg, se determina a partir del poder calorífico superior (*PCS*) y la fracción en peso de hidrógeno en base seca (*H*), por medio de la siguiente expresión [Zhang *et al.*, 2012]:

$$PCI = PCS - 21,978H \quad (1.11)$$

y β está dado por:

$$\beta = \frac{1,0412 + 0,2160 \frac{H_2}{C} - 0,2499 \frac{O_2}{C} \left[1 + 0,7884 \frac{H_2}{C} \right] + 0,0450 \frac{N_2}{C}}{1 - 0,3035 \frac{O_2}{C}}, \quad \text{para } 0,667 \leq \frac{O_2}{C} \leq 2,67 \quad (1.12)$$

Fracciones másicas de carbono, nitrógeno, oxígeno e hidrógeno, en base seca.

Sin embargo, el parámetro β tiene diferentes definiciones para ser calculado, así [Ptasinski, available online; Abuadala y Dincer, 2010]:

Para carbón:

$$\beta = 1,0437 + 0,1869 \frac{x_{H_2}}{x_C} + 0,0617 \frac{x_{O_2}}{x_C} + 0,0428 \frac{x_{N_2}}{x_C} \quad (1.13)$$

Donde x_i es la fracción molar de cada elemento.

Para aceites vegetales líquidos

$$\beta = 1,0374 + 0,0159 \frac{H}{C} + 0,0567 \frac{O}{C} \quad (1.14)$$

Donde $\frac{H}{C}$ y $\frac{O}{C}$ representan las relaciones atómicas en el aceite vegetal.

Biocombustibles sólidos

$$\beta = \frac{1,044 + 0,0160 \frac{H}{C} - 0,3493 \frac{O}{C} [1 + 0,0531 \frac{H}{C}] + 0,0493 \frac{N}{C}}{1 - 0,4124 \frac{O}{C}} \quad (1.15)$$

Donde $\frac{H}{C}$, $\frac{O}{C}$ y $\frac{N}{C}$ representan las relaciones atómicas en el aceite vegetal.

Para diferentes combustibles desde carbón hasta biomasa

$$\beta = 1,0438 + 0,0158 \frac{H}{C} + 0,0813 \frac{O}{C}, \quad \text{para } \frac{O}{C} \leq 0,5 \quad (1.16)$$

$$\beta = \frac{1,0414 + 0,0177 \frac{H}{C} - 0,3328 \frac{O}{C} [1 + 0,0537 \frac{H}{C}]}{1 - 0,4021 \frac{O}{C}}, \quad \text{para } 0,5 \leq \frac{O}{C} \leq 2,0 \quad (1.17)$$

Donde H, C y O son fracciones molares. Las unidades de exergía con estas correlaciones son en MJ/kg.

Para la transformación de la biomasa superficial arbórea en bioenergía se requiere de plantas de generación de bioenergía, por tal razón se mencionan conceptos y definiciones que nos ayuden a entender de manera clara el alcance de la propuesta, enmarcada en la generación térmica que nos provee la biomasa.

1.5 Plantas de Generación de Bioenergía

1.5.1 Definición

Una planta de generación de energía es un complejo creado por el hombre destinado a transformar la energía contenida y proveniente de alguna fuente de la naturaleza en una forma de energía útil para el hombre. La energía útil es energía que se encuentre en alguna de las formas: Cinética, potencial, trabajo o energía mecánica o energía eléctrica [Moran y Shapiro, 2004]. Modernamente a la energía útil se ha dado en llamarla Exergía [Casas y Morales, 2009] y aquella forma de energía completamente incapaz de transformarse en trabajo, se le llama Anergía [Martínez y Casals, 2002]. La planta de generación de energía viene a ser un complejo destinado a obtener exergía de alguna fuente de energía de la naturaleza [Mendoza *et al.*, 2012; Cengel y Boles, 2009].

Ejemplos de plantas de generación de exergía son: Las centrales termoeléctricas, las instalaciones fotovoltaicas, las centrales hidroeléctricas, los automotores etc. Todas dedicadas a transformar energía de una fuente en alguna forma de energía útil ya sea trabajo, energía cinética, electricidad, etc. [UPME, 2005]. La primera forma útil de energía para el hombre fue la energía calórica y casi inmediatamente la energía mecánica. Posteriormente, al descubrirse la energía eléctrica y sus bondades para su transporte y utilización, está paso a ser una de las prestaciones más importante para el hombre [Cabrera, 2007; Cengel y Boles, 2009].

1.5.2 Tipos de Plantas de Generación de Energía

En Colombia el sector eléctrico está dominado por la generación de energía hidráulica que es el 64% de la producción y la generación térmica es de 33%. No obstante, el gran potencial de energías renovables tales como la eólica, solar y la biomasa apenas si ha sido explorado [UPME, 2005].

La primera clasificación de estas plantas se puede hacer tomando como base el tipo de fuente de energía que utilice. De esta manera se tendrán [Cengel y Boles, 2009]:

1. Plantas térmicas.
 - a. Solares
 - b. De combustión
 - c. Atómicas
2. Plantas hidráulicas.
3. Plantas eólicas.
4. Plantas solares.
5. Plantas geotermales.
6. Plantas de fuentes novedosas o no tradicionales.

Las anteriores plantas tienen como fuente de alimentación energética primaria, respectivamente, el calor, el agua, el viento, el sol, y el calor de la tierra o una fuente novedosa que mediante un procedimiento diferente al tradicional permite transformarla en energía [Cabrera, 2007]. Cada una de las anteriores va a ser explicadas brevemente a continuación:

- 1.5.2.1 Plantas Térmicas

En este grupo caben todas las plantas de generación de energía que utilizan como fuente de alimentación primaria el calor proveniente de los combustibles o el calor del mar o del sol. De esta forma pueden ser de combustión o de no combustión. Las solares térmicas (las que usan el calor del sol) hacen parte de este tipo de plantas. Las plantas de combustión pueden ser de combustión directa o de combustión indirecta [Cengel y Boles, 2009].

- 1.5.2.2 Plantas Solares

La fuente de energía más importante de la tierra es el Sol. Gracias a el existen todos los organismos y se ponen en acción, los procesos terrestres. La energía solar se trasmite en forma de ondas electromagnéticas o fotones. Las plantas vegetales mediante la fotosíntesis desde los comienzos de la existencia de la vida misma sobre la faz de la tierra, han capturado y transformado la energía solar en energía química, la cual actúa como “pegamento” de la estructura molecular de los tejidos. Los combustibles mismos, no son sino energía proveniente del sol que se acumula en los tejidos de la estructura molecular y atómica de los seres sobre la tierra, animales y vegetales, vivos o ya desde hace tiempo sepultados (petróleo, carbón, gas natural) como combustibles fósiles. El hombre ha estado tratando de imitar los procesos de captura de energía solar que realiza la naturaleza y ha logrado montar plantas térmicas de generación de energía, con el aprovechamiento de la componente térmica de la radiación solar o de la energía electromagnética de los fotones en las plantas fotovoltaicas después de descubrir el efecto fotoeléctrico con las celda Solares [Cabrera, 2007; Posso, 2002].

- 1.5.2.3 Plantas Hidráulicas

Aquí se encuentran todas las plantas de generación que obtienen su fuente de energía del agua, ya sea dulce (en los ríos o lagos) o del mar. Por lo tanto las mareomotrices (que transforman energía de las mareas) y las oleo motrices (que transforman energía de las olas) hacen parte de este grupo lo mismo que las centrales hidroeléctricas y las instalaciones micro y mini hidráulicas [Cabrera, 2007; Posso, 2002].

▪ 1.5.2.4 Plantas Eólicas

Son todas aquellas plantas de generación de energía que utilizan como fuente la energía contenida en el viento, es decir aquella que se obtiene de la energía producida por las capas en movimiento gracias a que presentan entre ellas diferentes temperatura y densidades [Cabrera, 2007; Posso, 2002].

▪ 1.5.2.5 Plantas Geotermales

El interior de la tierra es un inmenso horno donde continuamente se está generando calor, el cual a través de mecanismos de convección, conducción y transferencia de masa, puede alcanzar la superficie terrestre. En Colombia existen diferentes plantas de generación que utilizan como fuente el calor de la tierra para generar energía. Una de ellas es la planta de Hidrosogamoso y Villamaría en Caldas [UPME, 2003]. Actualmente se adelantan proyectos con países vecinos como Ecuador para continuar con la implementación de esta tecnología en Colombia [Mérida, 2012].

1.5.3 Bioenergía

A nivel mundial existe un constante incremento en el consumo de energía lo que conlleva a serios problemas que deben ser resueltos a corto plazo. Las mayores reservas de combustibles fósiles están localizadas en algunos países, causando una gran volatilidad en el abastecimiento de los mismos. La bioenergía es una energía renovable producida de materiales derivados de fuentes biológicas (recursos biomásicos). Los recursos biomásicos se encuentran disponibles en distintas formas o tipos, incluyendo cultivos energéticos, residuos de agricultura, residuos forestales, plantas acuáticas, desechos humanos y animales, desechos municipales, etc. [Uasuf y Hilbert, 2012].

1.5.4 Fuentes Generadoras de Energía en Colombia

En Colombia se cuenta con las siguientes tecnologías como fuentes generadoras de energía y a continuación se hace una breve descripción de cada una de ellas [UPME, 2005]:

▪ 1.5.4.1 Hidroelectricidad

Se trata de una tecnología ampliamente conocida y aplicada en el país para un rango muy amplio de capacidades instaladas, desde algunos kW hasta más de 1000 MW. Existen innumerables configuraciones o esquema para nombrarlas, para el presente estudio se

adoptó la clasificación que sugiere la Organización Latinoamericana de Energía (OLADE) para este tipo de aprovechamientos, la cual se presenta a continuación [[Carrillo, 2007](#); [Palau y Prieto, 2009](#)]:

Picocentrales: Capacidad instalada entre 0,5 y 5 kW, operación a filo de agua, aplicable a zonas no interconectadas o casos aislados de zonas interconectadas. La planta típica para el análisis corresponde en este caso a una central de 5 kW de capacidad.

Microcentrales: Capacidad instalada entre 5 y 50 kW, operación a filo de agua, aplicable a zonas no interconectadas o casos aislados de zonas interconectadas. La planta típica para el análisis corresponde en este caso a una central de 50 kW.

Minicentrales: Capacidad instalada entre 50 y 500 kW, operación a filo de agua, aplicable a zonas no interconectadas o casos aislados de zonas interconectadas. La planta típica para el análisis corresponde en este caso a una central de 500 kW. En este caso se evaluaron dos centrales una para saltos del orden de los 60 m y otra de baja caída para saltos del orden de los 4 m.

Pequeñas Centrales Hidroeléctricas (PCH): Capacidad instalada entre 500 y 10000 kW, operación a filo de agua, aplicable a zonas no interconectadas y zonas interconectadas (sin posibilidad de participar en el despacho eléctrico). La planta típica para el análisis corresponde en este caso a una central de 10000 kW (1 MW).

Centrales Hidroeléctricas (CH): Capacidad instalada mayor a 20 MW, aplicable a zonas interconectadas, con participación obligada en el despacho eléctrico. Las plantas típicas para el análisis corresponden en este caso a centrales de 200 MW y 600 MW.

▪ 1.5.4.2 Centrales térmicas a gas

Para este recurso se definieron las siguientes plantas típicas [[González, 2010](#); [Espejo, 2007](#)]:

Ciclo Simple: aplicables a zonas interconectadas, con capacidades instaladas típicas de: 50 MW en una unidad, 150 MW en una unidad y 300 MW en dos unidades de 150 MW cada una.

Ciclo Combinado: aplicables a zonas interconectadas, con capacidad instalada típica de: 450 MW, obtenidos mediante dos unidades a gas de 150 MW cada una y una unidad a vapor de 150 MW.

Cierre de Ciclo: aplicable a zonas interconectadas, se considera como proyecto típico la instalación de una unidad de vapor de 150 MW para cerrar el ciclo de una central de 300 MW conformada por dos unidades a gas de 150 MW cada una.

1.5.4.2.1 Centrales térmicas a carbón.

En el aprovechamiento de este recurso minero energético se plantearon las siguientes plantas típicas [Katz, 2001; Linkohr, 2006]:

Tecnología de Carbón Pulverizado: Capacidad instalada de 50 MW, 150 MW y 300 MW en una unidad, todas con tecnología de enfriamiento en ciclo semi-húmedo. Dada las capacidades instaladas estas centrales se consideran exclusivamente para zonas interconectadas.

Tecnología de Lecho Fluidizado: Capacidad instalada de 150 MW en una unidad, con tecnología de enfriamiento en ciclo semi-húmedo. Igualmente aplicable a zonas interconectadas. Así mismo se considera una planta de 150 MW de capacidad operando con mezcla de carbón y biomasa (dendroenergía).

No se considera ciclo abierto de enfriamiento ya que el volumen de agua que ésta tecnología requiere y los impactos ambientales que conlleva, la harían no factible en casi la totalidad del país.

1.5.4.2.2 Centrales térmicas a diesel o fuel oil

En este caso se considera la tecnología de motores alternantes con capacidad instalada de 2 MW, aplicable exclusivamente a centros poblados de las zonas no interconectadas. Las alternativas en esta tecnología dependen del combustible utilizado [Hourné *et al.*, 2012]:

Motores alternantes de 2 MW operando con Fuel oil

Motores alternantes de 2 MW operando con diesel

Motores alternantes de 2 MW operando con biodiesel

- 1.5.4.3 Energía Eólica

Se cuenta con equipos de baja potencia para zonas no interconectadas con generador sincrónico y almacenamiento en baterías. Estas plantas son la eólica micro y eólica pequeña [Espejo, 2004]:

EMCO: Eólica Micro con potencia nominal 1.5 kW

EP: Eólica Pequeña con potencia nominal 15 kW

Para operar dentro del sistema interconectado se cuenta con tres plantas típicas con aerogenerador de eje horizontal tripéala a barlovento de regulación por pérdida y/o cambio de paso.

EMDA: Eólica Mediana con potencia nominal 225 kW

EGS: Eólica a Gran Escala con potencia nominal 1.3 MW

PE: Parque Eólico con potencia nominal 19.5 MW

Para proyectos que consideren las dos últimas plantas típicas deberán ser desarrollados en zonas de alto potencial eólico donde exista interconexión al sistema eléctrico Nacional.

- 1.5.4.4 Energía Solar

Generación a pequeña escala: Son sistemas individuales y domésticos, en aplicaciones rurales aisladas, instalados sobre tejados, azoteas de casas [Rodríguez, 2008].

SFV 50 Wp de DC: Suple las necesidades de un grupo familiar pequeño.

SFV 300 Wp de DC/AC para ZNI: Suple las necesidades de una vivienda de mayor demanda eléctrica.

Generación a mediana escala: Son sistemas centralizados, que pueden brindar soluciones energéticas a pequeñas comunidades [Funes et al., 2011].

SFV 3 kWp de AC para ZNI: Esta planta puede atender 10 usuarios (viviendas) con los servicios básicos de iluminación, un ventilador, radio grabadora, TV a color de 14" y equipo de sonido compacto.

SFV 30 kWp de AC para SIN: Sistemas centralizados en edificios, normalmente integrados en la arquitectura de los mismos o comunidades de vecinos.

Generación fotovoltaica a gran escala: Son generalmente instalaciones conectadas a red, de superficies extensas [[Perpiñán et al., 2012](#)].

SFV 300 kWp de AC para SIN

Centrales de generación fotovoltaica

SFV 3.000 kWp de AC para SIN

▪ 1.5.4.5 Energía Geotérmica

La planta típica seleccionada para la generación de energía eléctrica con recursos geotérmicos en Colombia, es la de ciclo binario con capacidad de 5 MW (pequeña central) GT 5 [[Iannelli y Gil, 2012](#)].

A continuación se mencionan las Zonas de Interconexión Eléctrica (ZIE) en Colombia. Se conoce como ZIE al conjunto de departamentos, ciudades, municipios, corregimientos, localidades y caseríos conectados y no conectados al Sistema Eléctrico Nacional (Ley 143 de 1994).

1.6 Tipos de Zonas de Interconexión Eléctrica

En Colombia se pueden encontrar los siguientes tipos de zonas de interconexión eléctrica:

1.6.1 Zonas No Interconectadas – ZNI

Se conoce como ZNI el conjunto de municipios, corregimientos, localidades y caseríos no conectados al sistema eléctrico interconectado nacional (Artículo 1 de la ley 855 de 2003). Como por ejemplo el Archipiélago de San Andrés, Providencia, Santa Catalina, Leticia en Amazonas, Capurganá en el Chocó, Puerto Carreño en Vichada y Mitú en el Vaupés. Las ZNI se definieron como aquellas Áreas geográficas “donde no se presta el servicio público de electricidad a través del sistema interconectado nacional” (Artículo 11, ley 143 de 1994). La prestación del servicio se hace principalmente mediante plantas de generación diésel, paneles solares y pequeñas centrales hidroeléctricas.

Estas zonas se caracterizan por su baja densidad poblacional, por estar ubicadas a una distancia muy lejana de los centros urbanos, por la dificultad de acceso y por su gran riqueza de recursos naturales. Por estas razones resulta muy costoso integrarlas al Sistema Interconectado Nacional (SIN) y se hace necesario que la prestación del servicio se genere directamente en cada zona, que gracias a la abundancia de recursos, se busca que las soluciones energéticas se basen en fuentes alternativas como el aprovechamiento de la biomasa y puedan reemplazar las fuentes tradicionales (plantas Diésel) [Flórez *et al.*, 2009; Castro y Hernández, 2010].

▪ 1.6.1.2 Zonas Aisladas - ZA

Las ZA son aquellas zonas olvidadas por los gobiernos porque poseen altísimos índices de pobreza. Son regiones con dificultades geográficas para comunicarse e integrarse al resto del país. Con escasa y dispersa población, y escaso acceso a los servicios públicos y como consecuencia de estos factores se encuentran en desventaja y desigualdad con respecto al desarrollo del resto del país [www.siel.gov.co]. Algunos ejemplos de zonas aisladas en Colombia son, las comunidades de indio Warao en el Delta del Orinoco y Mutis-Utria en el pacífico colombiano las zonas aisladas están incluidas en las ZNI.

▪ 1.6.1.3 Zonas Interconectadas - ZI

Las ZI se definieron como aquellas áreas geográficas “donde se presta el servicio público de electricidad a través del sistema interconectado nacional” conectadas entre sí a: plantas y equipos de generación, a redes de interconexión, a redes regionales e interregionales de transmisión, a redes de distribución y a las cargas eléctricas de los usuarios [Castro y

Hernández, 2010]. Ejemplos de Zonas Interconectadas al sistema eléctrico nacional son: en Palmira-Valle la cabecera municipal, Zona urbana de Cali, entre otras [www.siel.gov.co].

2. Materiales y Métodos

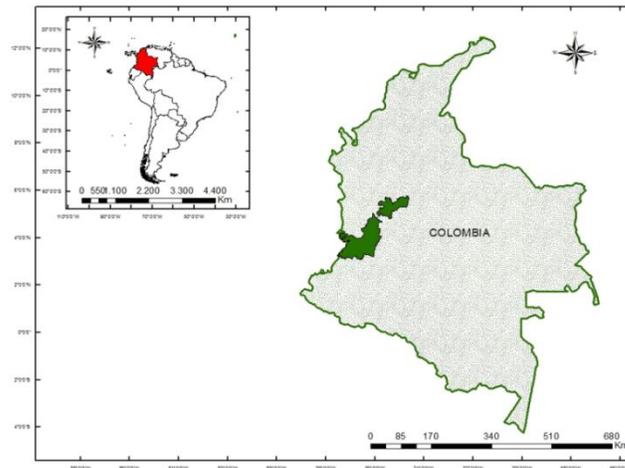
La metodología propuesta para llevar a cabo este proyecto se desarrolló en 7 etapas, las cuales se describen a continuación. Cada una de las etapas contempla la secuencia lógica de pasos y procedimientos seguidos para el logro de los objetivos y obtención de resultados propuestos en el proyecto.

A continuación se realiza una breve descripción del área de estudio para este proyecto:

El Valle del Cauca es uno de los departamentos objeto de estudio que hacen parte de los 32 departamentos de Colombia. Está situado en el suroccidente del país, entre la Región Andina y la Región Pacífica. Gran parte del departamento está en el valle geográfico del Río Cauca, entre las cordilleras occidental y central, donde proviene su nombre; tiene una superficie total de 22,195km². La capital del Valle del Cauca es Santiago de Cali, con una población aproximada de 4,520,480 habitantes según proyección demográfica del año 2013 . Este departamento presenta un gran potencial de biomasa forestal que podría ser utilizada como un combustible alternativo y es un territorio que posee un gran porcentaje de ZNI que están siendo alimentadas por plantas diésel de manera intermitente [www.fonade.gov.co]. En el valle del cauca existen 13,400 habitantes sin servicio de energía eléctrica de los 1,3 millones de habitantes del país [IPSE, 2013].

El otro departamento objeto de estudio es Caldas, tiene una población aproximada de 984,415 habitantes acorde a las proyecciones demográficas del año 2013 y una superficie de 7.888km². La capital de Caldas es Manizales, y forma parte del Eje Cafetero y de la región paisa. El departamento tiene límites al norte con el departamento de Antioquia, al oriente con los departamentos de Cundinamarca y Boyacá, al occidente con el departamento de Risaralda y al sur con ese mismo departamento y el Tolima. Este departamento al igual que el Valle del Cauca posee un total de 46 subestaciones diésel que alimentan ZNI y por su posición geográfica posee un gran potencial de zonas boscosas [www.fonade.gov.co]. La figura 2.1 muestra el mapa del área de estudio.

Figura 2-1: Área de Estudio



Fuente: Elaboración propia

2.1 Etapa 1: Recolección de información básica

En esta etapa se recopiló información bibliográfica que comprendió: aspectos teóricos y datos experimentales del uso de sensores remotos para la estimación de biomasa forestal, sistemas de información geográfica, obtención y procesamiento de imágenes, cálculos de índice de vegetación, cálculos para la determinación de energía y exergía, potencial energético de la biomasa forestal, fuentes de generación de energía y zonas de interconexión eléctrica en Colombia, entre otros. Se revisaron investigaciones realizadas en el tema de uso de los sensores remotos y los sistemas de información geográfica para el cálculo de la biomasa forestal a nivel nacional e internacional. Se realizó estudio básico de recolección de información de distintos aspectos de los departamentos objeto en estudio, la cual se encuentra condensada en la bibliografía utilizada.

2.2 Etapa 2: Obtención y procesamiento de imágenes

Se obtuvieron imágenes y datos globales MODIS para la elaboración de los mapas de biomasa. Estos datos e imágenes están disponibles de manera gratuita en la página de la NASA, Centro Activo de Archivos de Procesos Distribuidos de la Tierra [<http://lpdaac.usgs.gov>; Argote *et al.*, 2011]. En este caso se utilizó, para el año 2010, el producto MOD44B, y para el período Enero-Junio de 2013 se utilizó el MOD13Q1. Fue necesario realizar una transformación y conversión a los datos originales a través de la

herramienta MRTTools, ya que las imágenes descargadas del portal, inicialmente no poseen la proyección(UTM para la Zona 18 Norte), ni el dátum (WGS84) requerido para este estudio. Transformadas las imágenes se procedió a seleccionar el área de estudio, los departamentos del Valle del Cauca y Caldas y se realizaron los cortes.

2.3 Etapa 3: Cálculo de EVI y VCF

Expuesto por (Anaya *et al.*, 2008) “Se calculan estos índices debido a que la biomasa es considerada estática a pesar de sus ganancias por procesos fotosintéticos y sus pérdidas por muerte y extracción vegetal. Estos índices son variables explicativas basadas en la teledetección, donde se asume que a mayor proporción de arbolado por pixel o altos valores de índice de vegetación están asociados a mayores valores de biomasa arbórea”.

2.3.1 Cálculo de EVI

Se procesaron doce imágenes del producto MOD13Q1 entregadas cada 16 días con una resolución espacial de 250m, por el satélite MODIS TERRA, durante los primeros seis meses del año, comprendidas entre el 01 de enero al 26 de junio de 2013. Una vez realizada la composición de las imágenes del producto para el primer semestre de 2013 y seleccionada el área de estudio se realizó el cálculo del EVI, para lo cual se usó la banda 2 del producto MOD13Q1, y se obtuvo un valor promedio del EVI para los departamentos del Valle del Cauca y Caldas, el cual se muestra en la figura 2.2

$$EVI = G * [(ρ_{IRC} - ρ_R) / (C1 + ρ_{IRC} + C2 * ρ_R - C3 * ρ_A)]$$

Donde,

EVI: Índice de Vegetación Mejorado

$ρ_{IRC}$ y $ρ_R$: Reflectividad en la banda del Infrarrojo Cercano y del Rojo

$ρ_A$: Reflectividad en la banda del Azul

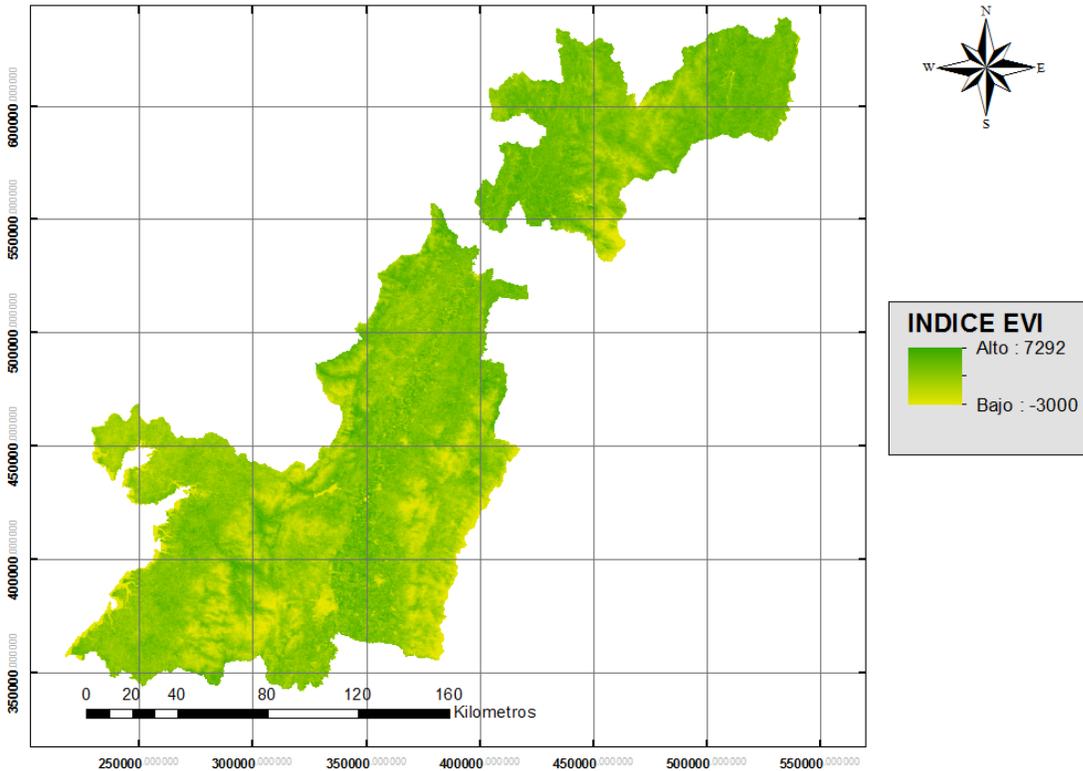
C1: 1.0, Factor ajustado para suelo desnudo

C2: 6.0, Coeficiente de resistencia atmosférica

C3: 7.5, Coeficiente de resistencia atmosférica

G: 2.5, Factor de ganancia

Figura 2-2: Promedio de EVI para el I semestre de 2013 para los departamentos del Valle del Cauca y Caldas



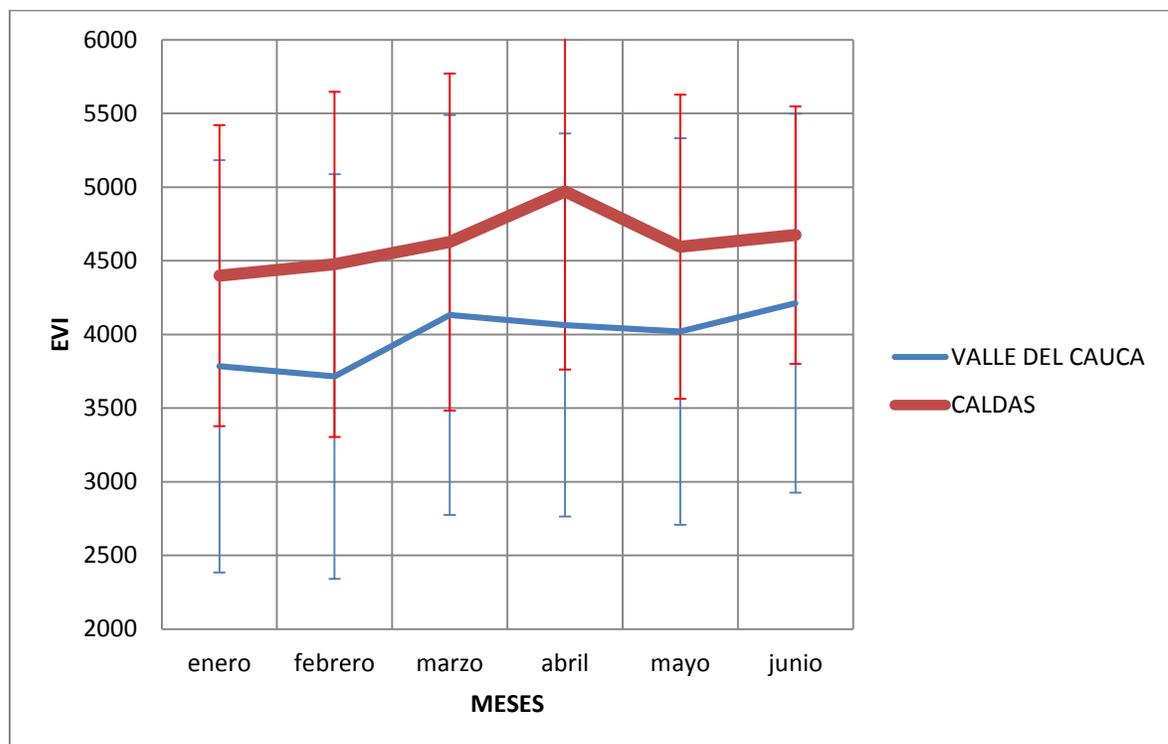
[Fuente: Elaboración propia].

En la figura 2.2 se muestran los datos promedio de *EVI* para la zona de estudio, donde los valores positivos representados en color verde son las zonas de vegetación y los valores iguales o inferiores a cero, representados en color amarillo son las zonas de rastrojo o donde no existe vegetación.

En la figura 2.3 se muestra el cambio promedio del *EVI* para el primer semestre de 2013 para los departamentos en estudio y se observa que para el departamento de Caldas el *EVI* presenta un aumento gradual de enero a abril donde se presenta el valor más alto (4980,8). Posteriormente se observa un descenso hasta mediados de mayo y luego asciende hasta junio. Mientras que en el Valle del Cauca se aprecia que el *EVI* desciende de enero a febrero y luego aumenta de mediados de febrero a mediados de marzo, donde se vuelve a observar una disminución hasta mediados de mayo y luego asciende hasta su

valor máximo (4132,2) en junio. En general se aprecia que para los dos departamentos el valor del EVI tiene una tendencia a aumentar entre enero y junio, indicando que entre esos meses se incrementa el área de zonas verdes. Comparando los valores de *EVI* de los departamentos en estudio a través del tiempo, se observa que el departamento de Caldas posee valores más altos de *EVI*, es decir, mayor proporción de zonas altas en vegetación que el departamento del Valle.

Figura 2-3: Variación del EVI para los departamentos del Valle del Cauca y Caldas para el primer semestre de 2013.



[Fuente: Elaboración propia].

2.3.2 Cálculo de VCF y biomasa superficial forestal arbórea

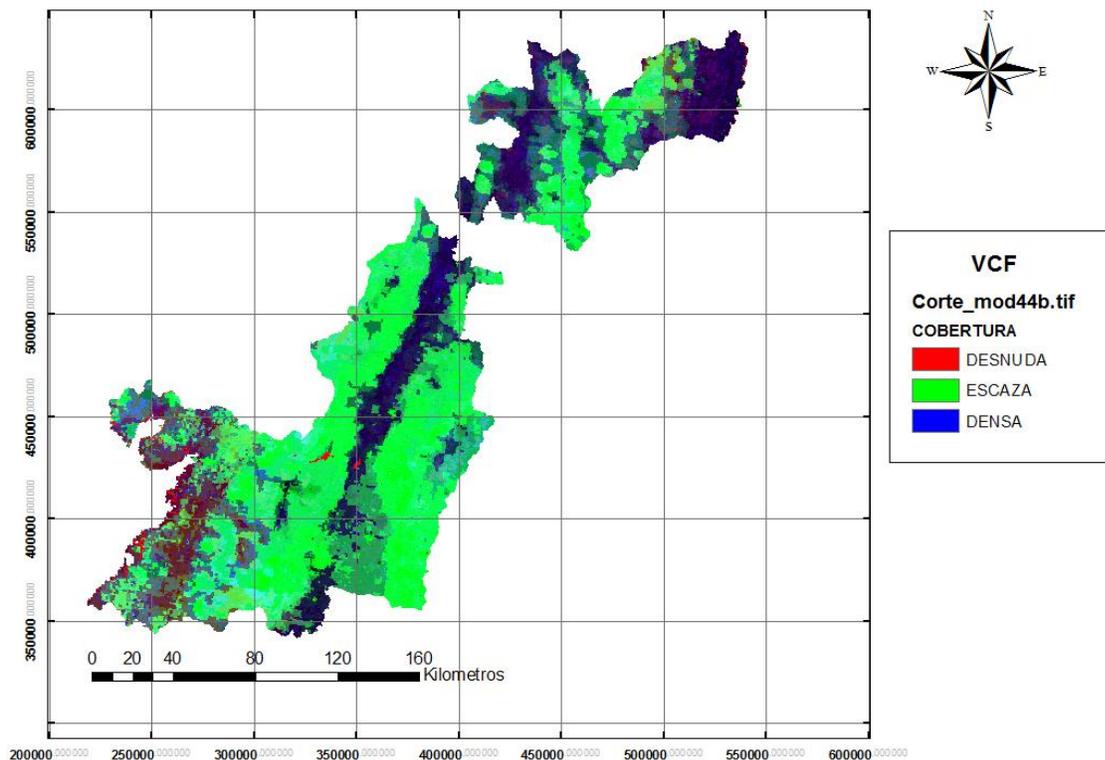
Con el producto de imágenes MOD44B se realizó un procesamiento para el año 2010 (resolución espacial de 250m), se llevó a cabo una composición de las bandas con el objeto de obtener un solo valor del ráster para el VCF, para el cálculo de la biomasa forestal arbórea de los departamentos en estudio se utilizó la banda 2, la cual contiene el porcentaje de cubierta arbórea. La composición de bandas se obtuvo utilizando la

herramienta *composite bands* del software ArcGIS 10.1. Se utilizó este producto del 2010, debido a que no se encuentra disponible para años posteriores. La figura 2.4 muestra la composición de *VCF* para el año 2010.

Ráster

El formato ráster se fundamenta en la división del área de estudio en una matriz de celdas, generalmente cuadradas. Cada una de estas celdas recibe un único valor que se considera representativo para toda la superficie abarcada por la misma. Este formato, por tanto, cubre la totalidad del espacio, este hecho supone una ventaja fundamental ya que pueden obtenerse valores de forma inmediata para cualquier punto del mismo.

Figura 2-4: Mapa de fracción vegetal para el año 2010 para los departamentos del Valle de Cauca y Caldas



[Fuente: Elaboración propia].

En la figura 2.4, después de la transformación y composición de las bandas, se identifican las vegetaciones arbóreas, donde el azul representa la cobertura densa, el verde representa la cobertura escasa, y el rojo indica la cobertura completamente desnuda y los cuerpos de agua. De igual manera la figura muestra que en el departamento de Caldas existe mayor proporción de cobertura densa, comparado con el Valle aunque esté sea de mayor extensión.

2.3.3 Determinación de la Biomasa

Con los resultados obtenidos para el *EVI* y *VCF* se incluyen en la ecuación (2.1) propuesta por Anaya *et al.* (2008). Y se procede al cálculo de la biomasa superficial forestal arbórea para los departamentos en estudio.

La biomasa superficial forestal arbórea se calculó con el siguiente algoritmo (Anaya *et al.*, 2008):

$$B_{fa} = (0,0014 * EVI - 2,8911) * (100 - VCF)/100 + FC * VCF/100 \quad (2.1)$$

Dónde:

B_{fa}: Biomasa superficial forestal arbórea (ton/ha).

FC: factor de corrección para contenido de arbolado. Este factor tiene un valor medio de 31.4 para el bosque secundario.

2.4 Etapa 4: Elaboración de mapas de biomasa superficial forestal arbórea

Una vez calculado el **B_{fa}** se procedió a la elaboración de los mapas de biomasa superficial forestal arbórea para los departamentos del Valle del Cauca y Caldas, con el fin de realizar una intersección entre las áreas de estos departamentos y las áreas de reserva natural. La diferencia entre estas áreas determina la biomasa útil para los cálculos de la cuantificación energética.

2.5 Etapa 5: Cálculo de la energía y la exergía de la biomasa superficial forestal arbórea

Se realizó un análisis teórico del potencial energético y exergético general de la biomasa superficial forestal, apoyado en correlaciones empíricas e información disponible en la literatura global. Se determinó de la literatura, el poder calorífico superior, el poder calorífico inferior y la exergía química de la biomasa.

Como no se tiene conocimiento de inventario de especies forestales de los bosques y manglares de los departamentos en estudio que involucren la caracterización física y química de los bosques (información actualmente no disponible en corporaciones y entes ambientales de la región), el análisis se realizó de forma general, considerando que la biomasa obtenida en zonas de alta concentración está constituida por corteza y ramas de árboles, hojas secas, hojas frescas, madera dura y madera blanda. La evaluación energética y exergética se llevó a cabo empleando la siguiente metodología:

El análisis energético consistió en determinar el poder calorífico superior e inferior. Para ello se estableció teóricamente el análisis próximo y elemental de la corteza y ramas de árboles, hojas secas, hojas frescas, madera dura y madera blanda. Con estos datos se obtuvo el poder calorífico superior con las ecuaciones (1.3) y (1.4) y con el PCS se determinó el poder calorífico inferior por la ecuación (1.11). Esto se realizó para la corteza y ramas de árboles, hojas secas, hojas frescas, madera dura y madera blanda, por separado y para tres mezclas (M1, M2 y M3) diferentes de ellos, como se muestra en la tabla 2.1.

Estas mezclas constan de diferentes proporciones de hojas, ramas, madera dura y madera blanda, y son una muestra representativa de la biomasa procesada, la cual contiene un potencial de producción de trabajo que se relaciona directamente con la exergía [[Moran y Shapiro, 2004](#)].

Tabla 2-1: Proporción porcentual, de cada tipo de biomasa en las mezclas.

Biomasa, Bi (%)	M1	M2	M3
Corteza de árboles, Ca	10	5	5
Ramas de árboles, Ra	10	15	15
Hojas frescas, Hf	5	2	2
Hojas secas, Hs	15	10	10
Madera blanda, Mb	30	50	18
Madera dura, Md	30	18	50

El análisis exergético consistió en determinar la exergía química utilizando la ecuación (1.10). El valor de β se obtuvo de la ecuación (1.12). De igual manera, la exergía química se determinó para la corteza y ramas de árboles, hojas secas, hojas frescas, madera dura y madera blanda, por separado y para tres mezclas diferentes de ellos (ver tabla 2.4).

El análisis próximo y elemental para las tres mezclas se obtuvo por ponderación, así:

$$P_{j,M}(\%) = \sum_{i=1}^I Bi * Pi \quad (2.2)$$

Donde $P_{j,M}(\%)$ es el porcentaje del parámetro j , ya sea del análisis próximo o elemental, en la mezcla; Bi es la fracción de la biomasa i en la mezcla, dado por los valores de la tabla 2.1; y Pi en el porcentaje del parámetro j en la biomasa i .

El análisis energético y exergético no se realizó experimentalmente dado que en las zonas donde está localizada la mayor concentración de biomasa de los departamentos del Valle del Cauca y Caldas, se presentan problemas de orden público que imposibilitan el acceso a bosques y manglares.

La biomasa contiene un potencial de producción de trabajo, es de esta manera que se relaciona con la exergía, y la energía tiene que ver con toda la energía que se podría producir a partir de la biomasa. La exergía ya tiene en cuenta la corrección debido a las

irreversibilidades o a las pérdidas asociadas a los procesos de transformación de energía de la biomasa [Moran y Shapiro, 2004].

En la tabla 2.2 se presenta el análisis próximo y elemental de la biomasa. Los análisis reportados en esta tabla son porcentajes en peso en base seca. Estos datos son obtenidos de la literatura [Nhuchhen y Salam, 2012; Miranda *et al.*, 2009].

Tabla 2-2: Análisis próximo y elemental de la biomasa [Nhuchhen y Salam, 2012; Miranda *et al.*, 2009].

Biomasa	Análisis último (%)Análisis próximo y elemental de la biomasa					Análisis próximo (%)		
	C	H	N	O	S	CF	MV	Cz
Corteza de árboles	53,10	6,10	0,20	40,60	-----	31,80	66,60	1,60
Ramas de árboles	48,65	6,56	2,59	42,19	0.01	16,95	80,01	3,04
Hojas frescas	42,58	5,42	12,33	39,65	0.02	13,51	74,67	11,82
Hojas secas	46,35	5,65	6,40	41,60	----	19,02	75,25	5,73
Madera blanda	52,70	6,30	0,20	40,80	----	28,30	70,00	1,70
Madera dura	50,20	6,20	0,01	43,50	----	25,00	72,30	2,70
M1	50,13	6,13	1,92	41,79	0,00	24,39	72,37	3,23
M2	50,83	6,23	1,39	41,54	0,00	24,95	72,36	2,68
M3	50,03	6,20	1,33	42,41	0,00	23,90	73,10	3,00

2.5.1 Energía de la biomasa: Poder calorífico

La tabla 2.3 representa los valores del PCS y PCI (Poder Calorífico Superior e Inferior en MJ/kg) calculados por medio de las ecuaciones (1.3) y (1.4) [Nhuchhen y Salam, 2012; Miranda *et al.*, 2009]. Teniendo en cuenta que para efectos de la cuantificación energética los valores significativos son el Carbono, Hidrógeno y el CF de acuerdo a las ecuaciones 1.3 y 1.4 empleadas para su cálculo. Se puede apreciar que la corteza de árboles, madera blanda y madera dura es el material que proporciona mayor cantidad de energía.

Tabla 2-3: Poder calorífico superior e inferior de algunas especies de biomasa.

Biomasa	PCS (MJ/kg)		PCI (MJ/kg)	
	Ec. (1.3)	Ec. (1.4)	Ec. (1.3)	Ec. (1.4)
Corteza de árboles	21,49	21,50	20,15	20,16
Ramas de árboles	20,25	18,23	18,81	16,79
Hojas frescas	16,72	15,50	15,53	14,31
Hojas secas	18,32	18,01	17,08	16,77
Madera blanda	21,56	20,79	20,18	19,40
Madera dura	20,28	19,90	18,91	18,54
M1	20,31	19,66	18,96	18,31
M2	20,71	19,90	19,34	18,53
M3	20,30	19,61	18,94	18,25

En la tabla 2.3 se muestran los valores de PCS y PCI para las mezclas propuestas en la tabla 2.1. Se observa que el PCS para las muestras M1, M2 y M3 es aproximadamente constante, con un valor promedio de 20,44 MJ/kg. De la misma manera, el PCI de las muestras M1, M2 y M3, es aproximadamente constante, obteniéndose un valor promedio de 19.1 MJ/kg.

2.5.2 Exergía química de la biomasa

Los valores del parámetro β (ecuación 1.12) y la exergía química se presentan en la tabla 2.4. Los valores de exergía química se calcularon a partir de la Ecuación (1.10) y los valores del PCI, se hallaron con los valores del PCS obtenidos de las ecuaciones (1.3) y (1.4).

En la tabla 2.4 se muestran los valores de exergía para las mezclas estudiadas. Se observa que el valor de la exergía de las muestras M1, M2 y M3 es aproximadamente constante, obteniéndose un promedio de 21,47 kJ/kg, 21470 kJ/ton para los valores calculados a partir del PCI calculado con la ecuación (1.3). De la misma manera, el valor promedio de exergía obtenido a partir del PCI calculado con la ecuación (1.4) es de 20,66 kJ/kg, 20660 kJ/ton. Las concentraciones porcentuales de la tabla 2.1 de las mezclas anteriormente observadas son similares a excepción de las concentraciones porcentuales de la muestra de madera dura (18%) y la muestra de madera blanda (50%).

Tabla 2-4: Exergía química de algunas especies de biomasa.

Biomasa	Beta	Exergía química Ec. (1.10) (kJ/kg)	
		Ec. (1.3)	Ec. (1.4)
Corteza de árboles	1,12	22,51	22,52
Ramas de árboles	1,13	21,26	18,98
Hojas frescas	1,15	17,87	16,46
Hojas secas	1,14	19,43	19,08
Madera blanda	1,12	22,56	21,70
Madera dura	1,13	21,31	20,88
M1	1,13	21,35	20,61
M2	1,12	21,73	20,82
M3	1,13	21,33	20,56

2.6 Etapa 6: Identificación y ubicación de las zonas no interconectadas

Con el apoyo de la página de internet del Sistema Información Eléctrico Colombiano (www.siel.gov.co) y el *software Google Earth* se procedió a la ubicación de las zonas no interconectadas de los departamentos del Valle del Cauca y Caldas. Las zonas no interconectadas de estos departamentos tienen este nombre debido a que presentan dificultades de acceso en vías y no hay posibilidad de llevarles la conexión eléctrica por sus altos costos y algunos por problemas de orden público. Es por ello que se espera obtener una solución local que proporcione la fuente adecuada para la generación de energía eléctrica sin ocasionar un impacto ambiental negativo a corto, mediano y largo plazo, pero que redunde en promover un desarrollo social, económico y cultural de dichas regiones.

Para la identificación y ubicación de las ZNI del Valle del Cauca y Caldas se tuvieron en cuenta las ZNI que no son susceptibles de integración al sistema eléctrico nacional y las vías de acceso a estos sitios, para lo cual se usó la información existente en la página de internet de la UPME [www.upme.gov.co], y para la georreferenciación de ZNI se usó el *software Google Earth*, así mismo se utilizaron los mapas bases de la red vial de los departamentos en estudio, obtenidas de la página de internet del IGAC [www.igac.gov.co].

Con esta información se generaron los mapas de ZNI de los departamentos del Valle del Cauca y Caldas.

A continuación se muestran en la tabla 2.5 las ZNI de mayor biomasa para el departamento del Valle del Cauca y los valores de biomasa para los pixeles del ráster [Fuente: Elaboración propia].

Tabla 2-5: Centros poblados no susceptibles de interconexión eléctrica del departamento del Valle del Cauca con mayores valores de biomasa.

Nombre Poblado	Longitud	Latitud	Centro Poblado	Dpto.	rast_B_(tn/ha)
Timba	-77.296370	3.497770	Caserío	Valle Del Cauca	8.23869991
Hato Viejo	-76.390497	3.818586	Caserío	Valle Del Cauca	5.14685678
Canangua	-76.368069	3.775513	Caserío	Valle Del Cauca	5.06183386
Guamia	-76.963051	3.718498	Caserío	Valle Del Cauca	5.05041122
La Palomera	-76.338617	3.897600	Caserío	Valle Del Cauca	4.67857122
Paramillo	-75.900000	3.999970	Caserío	Valle Del Cauca	4.63778067
El Limon	-76.428831	3.613357	Caserío	Valle Del Cauca	4.44191599
El Guali	-76.378198	3.434062	Inspección	Valle Del Cauca	4.43361473
Bello Horizonte	-77.147050	3.714600	Caserío	Valle Del Cauca	4.43350029
La Cuchilla	-75.949950	4.350070	Caserío	Valle Del Cauca	4.37208796
La Guaira	-76.409961	4.048127	Caserío	Valle Del Cauca	4.25899696
La Guaira	-76.410004	4.048110	Caserío	Valle Del Cauca	4.25899696
Montegrande	-76.245015	4.000404	Caserío	Valle Del Cauca	4.25718212
Sabanazo	-75.896963	4.382960	Caserío	Valle Del Cauca	4.18515778
Llano Grande	-75.582978	5.187014	Inspección	Valle Del Cauca	4.13704395
El Oro	-76.316610	4.449980	Caserío	Valle Del Cauca	4.10967207
La Delfina	-76.800008	3.833370	Caserío	Valle Del Cauca	4.09486198
La Plata	-75.674628	5.035920	Inspección	Valle Del Cauca	4.08375502
Fenicia	-76.370855	4.080823	Caserío	Valle Del Cauca	4.07417583
Guadualito	-77.046372	3.825783	Caserío	Valle Del Cauca	4.06302500
Encimadas	-75.348100	5.583310	Inspección	Valle Del Cauca	4.06071949
Zacarias	-77.000000	3.817750	Inspección	Valle Del Cauca	4.05519485
El Manzano	-75.900000	4.316680	Caserío	Valle Del Cauca	4.04717684
La Magdalena	-76.202619	3.881730	Inspección	Valle Del Cauca	4.02055454

A continuación se muestran en la tabla 2.6 las ZNI de mayor biomasa para el departamento de Caldas y los valores de biomasa para los pixeles del ráster [Fuente: Elaboración propia].

Tabla 2-6: Centros poblados no susceptibles de interconexión eléctrica del departamento de Caldas con mayores valores de biomasa.

Nombre Población	Longitud	Latitud	Centro Poblado	Dpto.	rast_B_(tn/ha)
Conventos	-75.479622	4.925520	Caserío	Caldas	5.06452656
Tabuyos	-75.800018	5.254083	Caserío	Caldas	4.83195543
El Jardín	-75.401697	5.174554	Caserío	Caldas	4.74525309
El Jardín	-75.401697	5.174566	Caserío	Caldas	4.74525309
El Jardín	-75.401695	5.174563	Caserío	Caldas	4.74525309
Guaco	-75.437279	5.655859	Inspección	Caldas	4.62057447
Moscovita Norcasia	-74.913580	5.578890	Caserío	Caldas	4.59025431
La Agustina	-74.651022	5.668705	Caserío	Caldas	4.54680014
Bellavista Chinchina	-75.686639	4.960241	Caserío	Caldas	4.54327917
El Vergel	-75.609969	5.520630	Caserío	Caldas	4.48809099
El Vergel	-75.609969	5.520630	Caserío	Caldas	4.48809099
San Luis	-75.844680	5.040961	Caserío	Caldas	4.45232868
Alejandria	-75.666700	5.166751	Caserío	Caldas	4.42469406
La Herradura	-75.425368	5.442645	Caserío	Caldas	4.39393663
Juan Dias	-75.661390	5.376950	Inspección	Caldas	4.39062500
El Cedral	-75.487634	5.540027	Caserío	Caldas	4.32546186
Cedral	-75.487631	5.540030	Caserío	Caldas	4.32546186
La Isla	-75.646993	5.173281	Caserío	Caldas	4.32193708
La Quiebra	-75.399280	5.639890	Caserío	Caldas	4.31312275
La Union (Salamina)	-75.499940	5.366650	Caserío	Caldas	4.25737619
Guayabal	-75.375011	5.665054	Caserío	Caldas	4.20363522
Union Tenerife	-75.042830	5.362470	Caserío	Caldas	4.18942690
San Pedro	-75.388420	5.634660	Caserío	Caldas	4.14898109
Aguabonita	-75.088856	5.407297	Corregimiento	Caldas	4.12468481
Varsovia	-75.549980	5.266740	Inspección	Caldas	4.12255001
Tamboral	-75.615060	5.150010	Caserío	Caldas	4.11380005
Las Gaviotas	-75.418467	5.197120	Caserío	Caldas	4.09852409
Las Gaviotas	-75.418461	5.197133	Caserío	Caldas	4.09852409
Hojas Anchas	-75.644812	5.515857	Inspección	Caldas	4.09012699
Isaza	-74.817084	5.565572	Corregimiento	Caldas	4.07914591
Manuelita	-75.054179	5.404843	Caserío	Caldas	4.06795406
Encimadas	-75.348100	5.583310	Corregimiento	Caldas	4.06071949
Palmichal	-75.133744	5.200813	Caserío	Caldas	4.02900505
Palmichal	-75.133742	5.200812	Caserío	Caldas	4.02900505

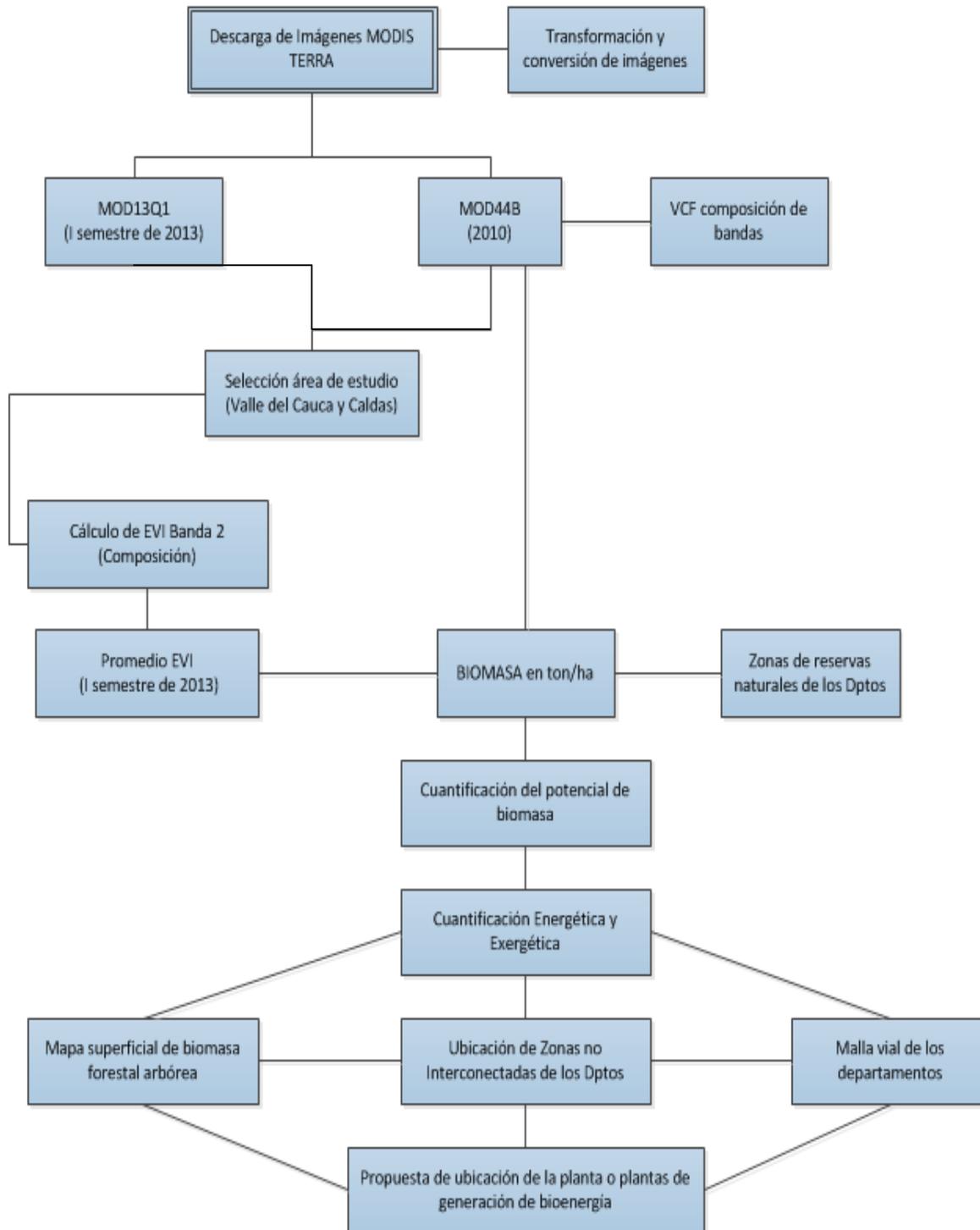
2.7 Etapa 7: Posible ubicación de plantas de generación de bioenergía

Los cálculos energéticos realizados en la etapa anterior, superpuestos con el mapa de la ubicación de las ZNI y el mapa de la malla vial de los departamentos en estudio, permitieron realizar una propuesta de ubicación de plantas de generación de energía para suplir las necesidades energéticas en dicha región.

Para la posible ubicación de los centros de acopio y de la planta de generación de bioenergía se tuvo en cuenta las ZNI de mayor biomasa. Para el cálculo de los costos de distancia se utilizó la extensión del software *ArcGIS 10.1 Spatial Analyst*, y para la ubicación de la planta se tuvo en cuenta la cantidad de biomasa disponible, así como el aprovechamiento energético a través de la combustión directa de la biomasa.

A continuación se muestra el desarrollo de la metodología en el esquema que se presenta en la figura 2.5. En esta figura se muestran los pasos realizados para el desarrollo del proyecto, descarga de imágenes, transformación, composición de bandas para el cálculo del *VCF*, cálculo del *EVI*, selección del área de estudio, obtención de la biomasa, cuantificación de la energía y la exergía, elaboración de mapas, y por último, la propuesta hipotética de la posible ubicación de la planta de generación de bioenergía.

Figura 2-5: Diagrama de flujo de la metodología empleada en este estudio



Fuente: Elaboración propia].

3. Resultados y Discusión

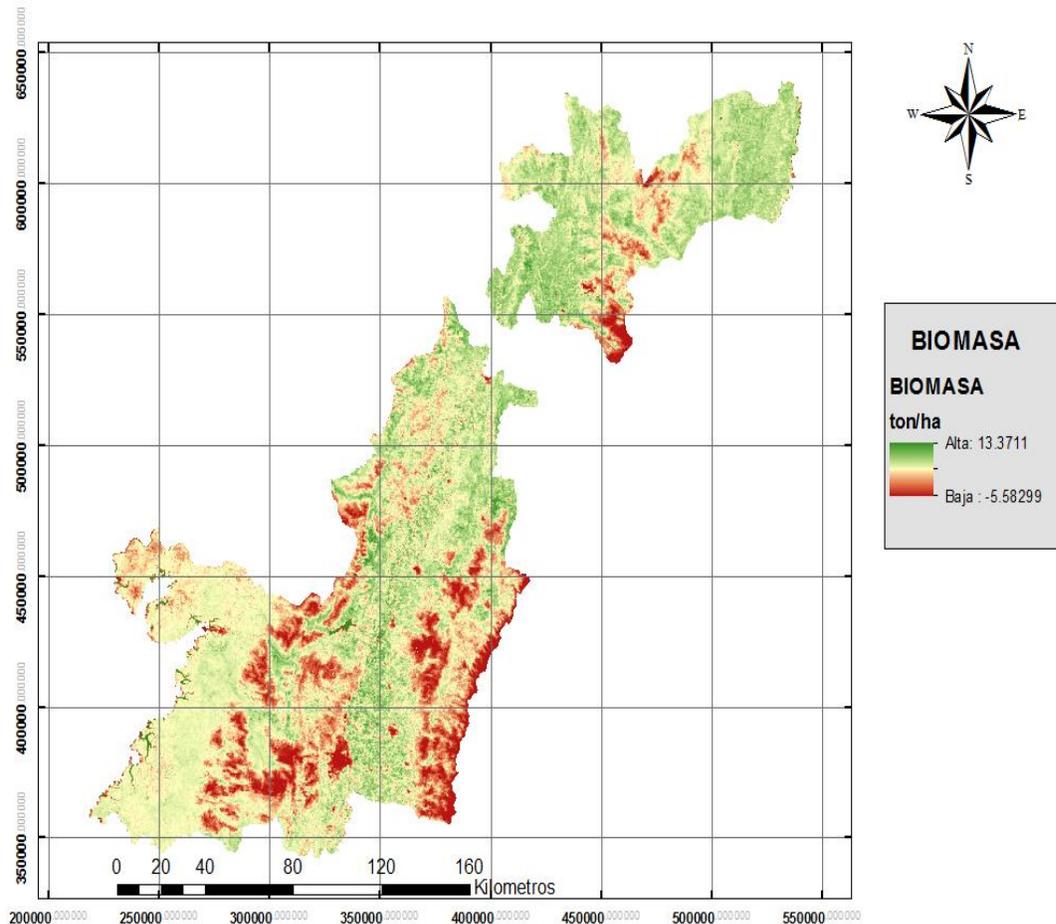
Los trabajos existentes de estimación de biomasa forestal arbórea en Colombia no se refieren a estimaciones departamentales, sino que están referidos a clases de vegetación homogénea. Los autores de estudios sobre estimación de biomasa aluden esto a las dificultades en cada uno de sus ecosistemas o tipos de vegetación, bien sea en términos de lo cerrado del dosel, la dinámica de la vegetación, la heterogeneidad en la distribución espacial o los aspectos concernientes al nivel de detalle y hasta la problemática de orden público y económico [Anaya *et al.*, 2008; Valencia *et al.*, 2012; Del Valle, 2000].

Ahora bien, tratar de generar un solo método que cubra todos los tipos de vegetación para los departamentos del Valle del Cauca y Caldas que son tan variados resulta una tarea compleja. Por tal razón para este estudio se estimó solo la biomasa superficial forestal arbórea para los departamentos antes mencionados, con el fin de establecer si es suficiente para el sostenimiento de una planta de generación de bioenergía que requiere una población sin interconexión eléctrica ubicada en las zonas en estudio.

3.1 Biomasa forestal arbórea

Para el Valle del Cauca se obtuvo un valor de biomasa de **916671.33 ton/ha**, y para Caldas se obtuvo **397994.05 ton/ha**. En la figura 3.1 se muestran los valores promedios de biomasa para los departamentos en estudio.

Figura 3-1: Distribución espacial de valores promedio de biomasa para los departamentos del Valle del Cauca y Caldas



[Fuente: Elaboración propia].

La figura 3.1 muestra la distribución de la biomasa de los departamentos en estudio en una escala de degradación de color. Los colores verde y amarillo representan zonas de alto contenido de biomasa. Para el Valle del Cauca fue de **916671.33 ton/ha**, las cuales están distribuidas en las zonas suroccidental con un 5,27%, suroriental con un 34,42%, norte con un 27,02% y la zona de reserva que comprende un 33,29% del departamento; siendo la de mayor proporción la suroriental. Entre tanto el departamento de Caldas obtuvo un valor de **397994.05 ton/ha**, distribuidos en las zonas suroccidental con un 39,29%, nororiental con un 46,7% y la zona de reserva con un 14,01%. Con los resultados obtenidos nos

permite inferir que el departamento de Caldas posee mayor densidad de biomasa forestal por (ha) que el departamento del Valle.

Para la estimación del potencial energético y exergético total de la biomasa superficial del Valle de Cauca y Caldas no se tienen en cuenta las zonas de reserva cuyas capas fueron obtenidas de la página del SIGOT [www.sigot.gov.co], y estas áreas fueron restadas del área total. Para el Valle del Cauca se restó el valor del área del Parque Nacional Natural los Farallones y el Parque Nacional Natural las Hermosas, mientras que para Caldas se restó el valor del área del Parque Nacional Natural los Nevados. Con estas consideraciones, se obtuvo un total de biomasa promedio superficial forestal arbórea para el Valle del Cauca de **846290,44 ton/ha** y para Caldas de **342235,08 ton/ha**. Teniendo en cuenta que el dato de biomasa es global para los departamentos en estudio, se podrá obtener un valor total de energía y exergía para dichos departamentos.

3.2 Cuantificación general de la energía y exergía de la biomasa superficial forestal arbórea

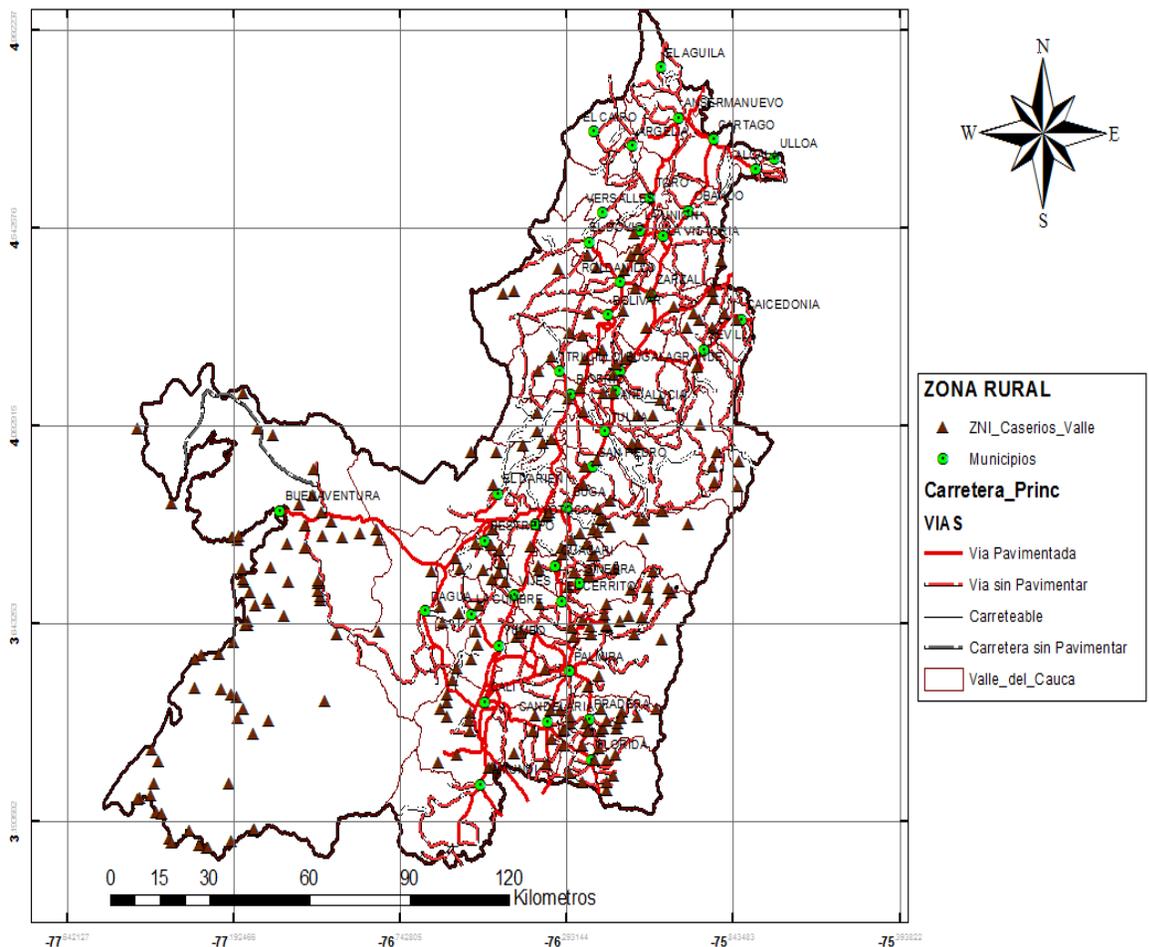
En apartado anterior se calcularon los promedios de biomasa superficial forestal arbórea por departamento. Estos valores son el tope del aprovechamiento de la biomasa forestal arbórea en cada departamento. Para cumplir con los porcentajes de extracción adecuados para que un ecosistema no pierda su equilibrio a mediano y largo plazo y no se afecte negativamente la masa forestal, se tendría que contar con todos los requisitos que exigen las Corporaciones Autónomas Regionales para realizar este tipo de extracción [[CONPES, 1996](#)]. Se procede al cálculo de la exergía de la biomasa forestal arbórea.

Teniendo en cuenta lo presentado en el apartado 3.1, se obtuvo el valor promedio de exergía a (partir del PCI calculado con la ecuación (1.3)) de **21470 kJ** por tonelada de biomasa forestal arbórea. De la misma manera, el valor promedio de exergía empleando otra forma de cálculo (obtenido a partir del PCI calculado con la ecuación (1.4)) es de **20660 kJ** por tonelada de biomasa forestal arbórea. Se puede observar que estos dos métodos de cálculo presentan valores similares. Esto permitiría afirmar que el método de cálculo de la exergía empleado en este trabajo es sólido y cualquiera de las dos aproximaciones podría emplearse en trabajos futuros.

3.3 Identificación y ubicación de las zonas no interconectadas

En la figura 3.2 se muestra la localización de las ZNI de Valle del Cauca (ver anexos A), que no son susceptibles de integración al sistema eléctrico nacional. En el mapa se presentan estas zonas por caseríos, los cuales están representados por triángulos. Los puntos verdes representan los municipios, las líneas sencillas representan las carreteras y las líneas dobles las vías férreas del departamento.

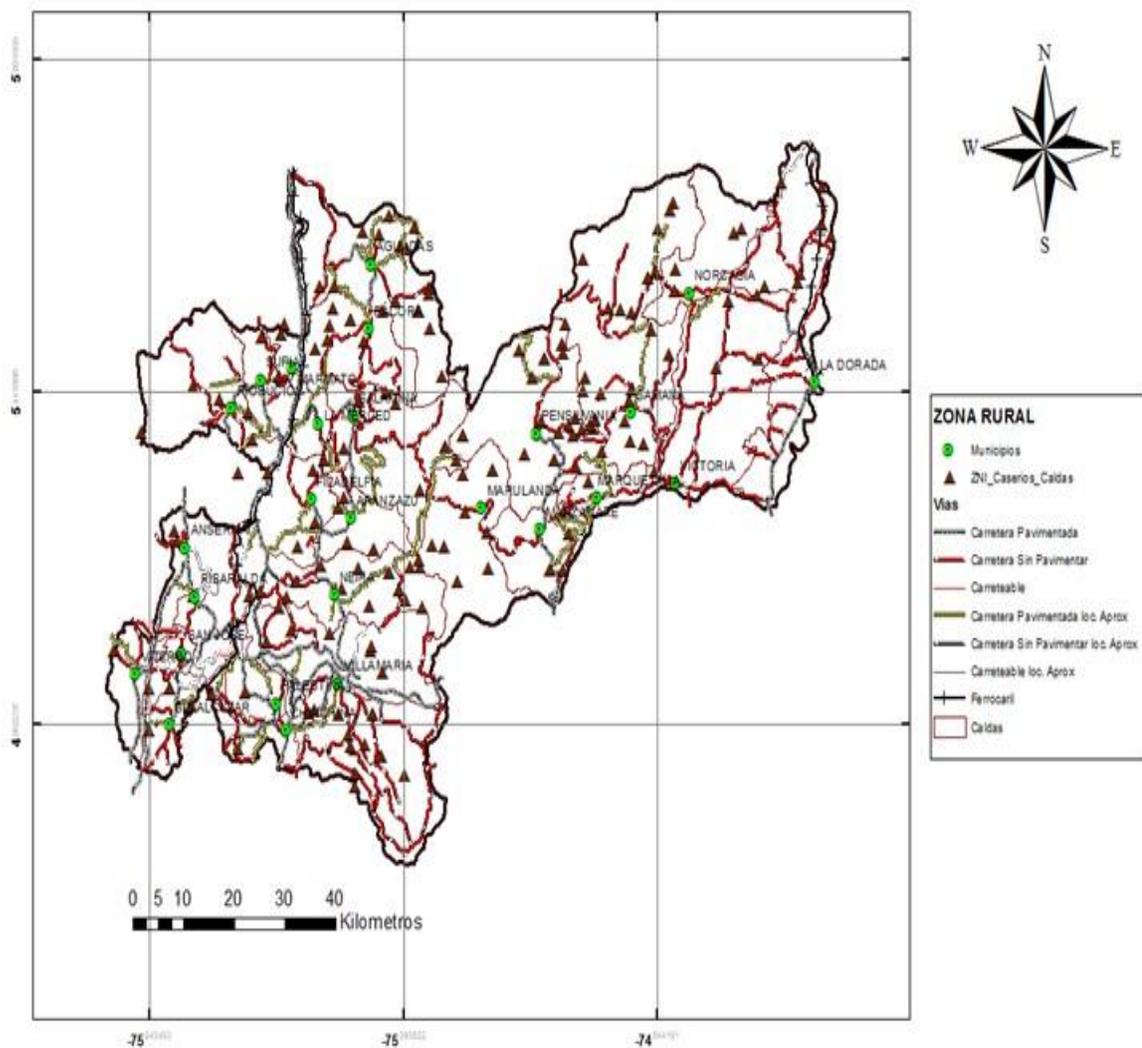
Figura 3-2: Mapa ZNI del departamento del Valle del Cauca



[Fuente: Elaboración propia].

En la figura 3.3 se muestra el mapa de la ubicación y localización de las ZNI de Caldas (ver anexos B), las cuales no son susceptibles de integración al sistema eléctrico nacional. En el mapa se presentan las ZNI por caseríos, los cuales están representados por triángulos. Los puntos verdes representan los municipios, las líneas sencillas representan las carreteras y las líneas dobles las vías férreas del departamento.

Figura 3-3: Mapa ZNI del departamento de Caldas



[Fuente: Elaboración propia].

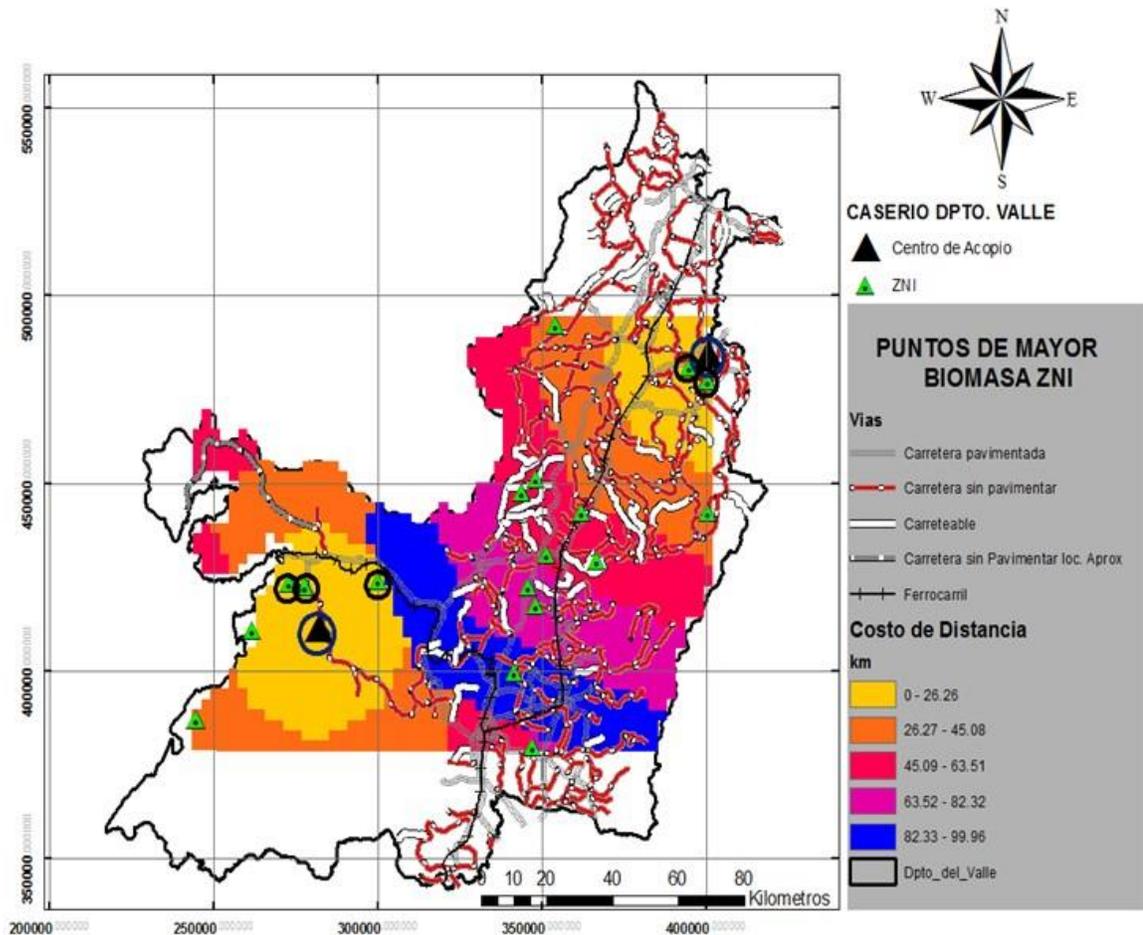
3.4 Posible ubicación de plantas de generación de bioenergía

La figura 3.4 muestra la posible ubicación de los centros de acopio y de las plantas de generación de energía. Los centros de acopio en Guamia y Sabanazo y las plantas de generación de bioenergía en Guamia, La delfina, Bazán, Sabanazo, Totoro y Manzanillo (representados en un mapa temático para el departamento del Valle).

La elección hipotética de los lugares se realizó teniendo en cuenta diversos factores como logística, demanda energética, y aspectos naturales como artificiales (Hidrografía, carreteras, asentamientos, elevaciones y pendientes).

Los centros de acopio están representados en triángulos cafés con círculos de color azul, y las posibles ubicaciones de las plantas de generación en triángulos verdes con círculos negros, las zonas de mayor biomasa se representan con triángulos verdes; las líneas sencillas representan las carreteras y vías férreas. Las distancias están representadas en colores y van de 0 – 100 km en el departamento del Valle del Cauca.

Figura 3-4: Mapa de costo de distancia y posible ubicación de centros de acopio del departamento del Valle del Cauca

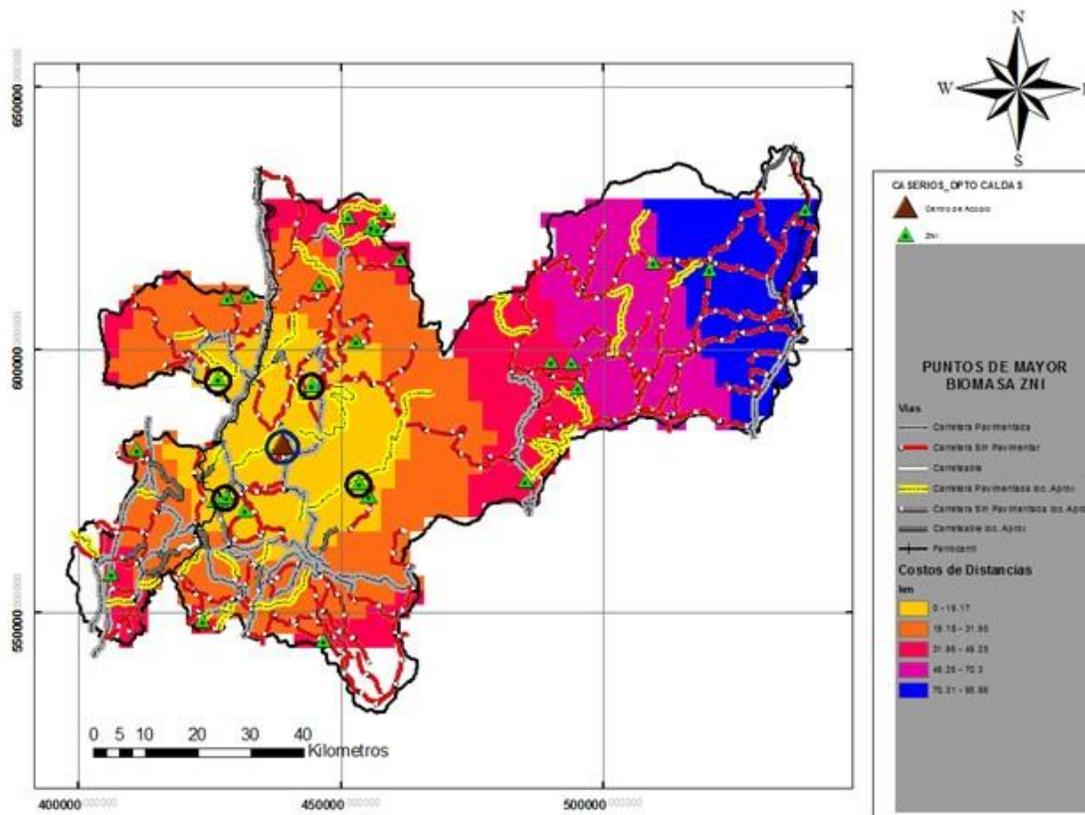


[Fuente: Elaboración propia].

La figura 3.5 muestra la posible ubicación del centro de acopio, así como la ubicación de la planta de generación de energía. El centro de acopio podría ser en Varsovia, y las posibles ubicaciones de la planta de generación de bioenergía podrían estar en Varsovia, El Jardín, Alejandría, Sausagua y La Secreta (representadas en un mapa temático para el departamento de Caldas). Para la propuesta hipotética de ubicación se tuvieron en cuenta diversos factores como de logística y demanda energética y aspectos naturales como artificiales (Hidrografía, carreteras, asentamientos, elevaciones y pendientes). El centro de acopio está representado en un triángulo café con un círculo de color azul, y las posibles

ubicaciones de las plantas de generación en triángulos verdes con círculos negros, las zonas de mayor biomasa se representan con triángulos verdes, las líneas sencillas representan las carreteras y vías férreas. Las distancias están representadas en colores y van de 0 – 100 km.

Figura 3-5: Mapa de costo de distancia y posible ubicación de centros de acopio del departamento de Caldas de



[Fuente: Elaboración propia].

4. Conclusiones y Recomendaciones

4.1 Conclusiones

El uso de sensores remotos permitieron la elaboración de mapas de densidad superficial de biomasa forestal arbórea, así como el cálculo de biomasa forestal arbórea, obteniéndose valores de 846290,44 ton/ha equivalentes a 38,22 ton/km² y 342235,08 ton/ha equivalentes a 46,18 ton/km² para los departamentos del Valle del Cauca y Caldas, respectivamente.

Con la ayuda de imágenes satelitales de los departamentos del Valle del Cauca y Caldas se realizó la elaboración de mapas de las zonas no interconectadas al sistema eléctrico nacional de estos departamentos.

La exergía permitió calcular el potencial energético promedio asociado a la biomasa forestal arbórea de los departamentos del Valle del Cauca y Caldas, el cual fue de 21,470 kJ/kg equivalentes a 5,938 W/h. Este importante potencial energético puede ser aprovechado en la obtención de bioenergía en zonas de estos departamentos que no están conectadas al sistema eléctrico nacional.

Con base en los resultados del potencial energético, se plantea que las plantas de generación de bioenergía en el departamento del Valle del Cauca podrían estar ubicadas en Guamia, La Delfina, Bazán, Sabanazo, Totoro y Manzanillo. Para el departamento de Caldas las plantas de generación de bioenergía podrían estar ubicadas en Varsovia, El Jardín, Alejandría, Sausagua y la Secreta. Con ello se plantea la posibilidad de generación de energía eléctrica sin ocasionar impactos ambientales negativos a corto, mediano o largo plazo, lo que podría redundar en promover un desarrollo social, económico y cultural en dichas regiones.

4.2 Recomendaciones

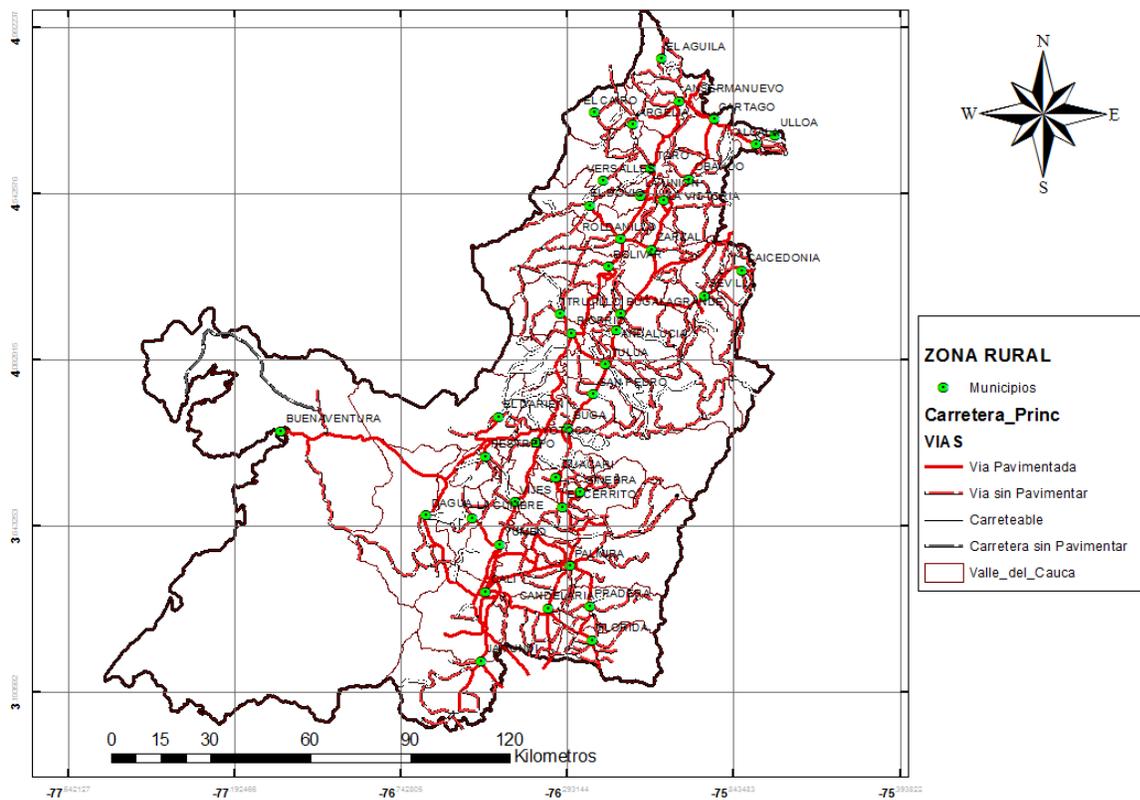
La metodología usada en este trabajo se podría extender a otros departamentos del país con problemas de interconexión eléctrica tales como Cauca, Choco, Putumayo, entre otros.

Sería interesante realizar un trabajo de investigación de tipo social en las regiones donde se propone construir la planta, de tal manera que se consideren aspectos como nivel de educación, ingresos por familia, acceso a la educación, acceso a demás medios etc. Esto con el propósito de establecer quién o quiénes se podrían encargar de la administración y operación de la planta, y establecer qué entes quedaría encargados de suministrar los recursos necesarios para el mantenimiento y correcta operación de la misma.

Para estudios futuros se recomienda realizar trabajos de campo tales como: identificación de especies arbóreas y caracterización de la biomasa). Lo cual permitiría contar con herramientas suficientes para un mayor aprovechamiento de la biomasa de los departamentos en estudio.

Es recomendable la implementación de plantas de generación de bioenergía en los lugares donde existen plantas diésel o fuel oíl, ya que ello implicaría reducir costos de compra y transporte de combustible a la planta y se mitigan impactos ambientales, causados por el uso de combustibles fósiles.

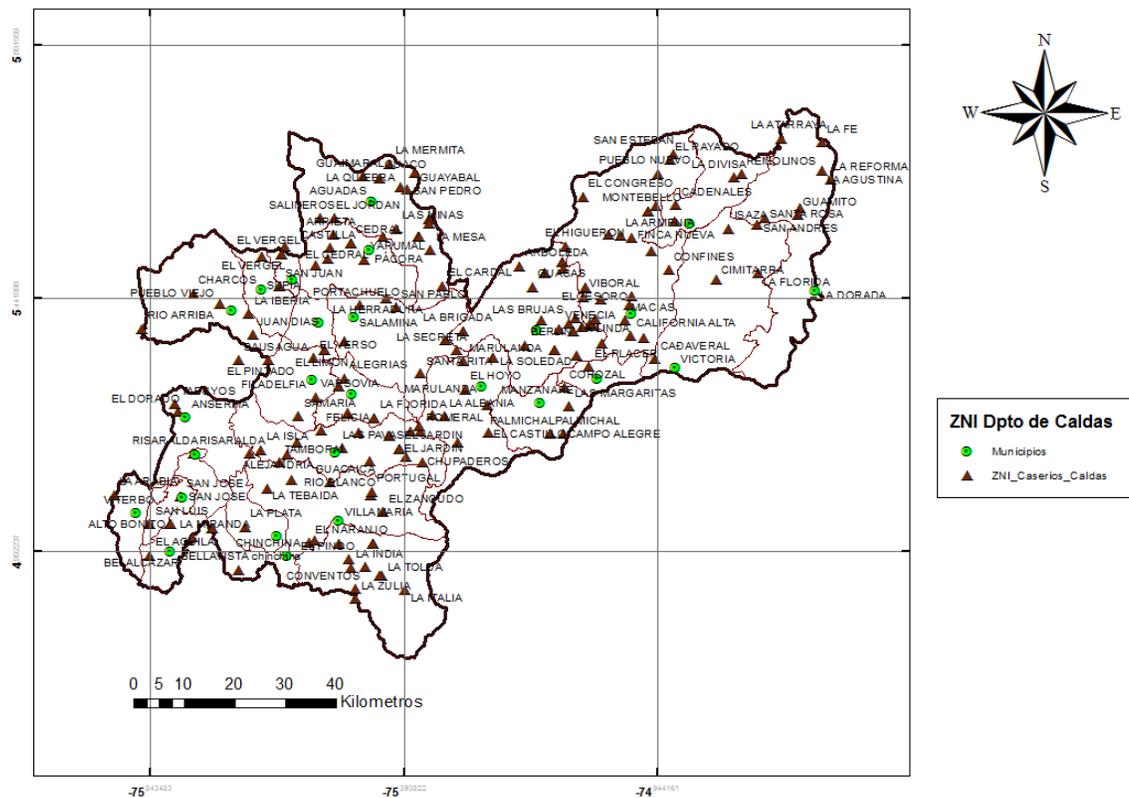
Anexo A2. Mapa de la red vial para el Dpto. del Valle del Cauca



[Fuente: Elaboración propia].

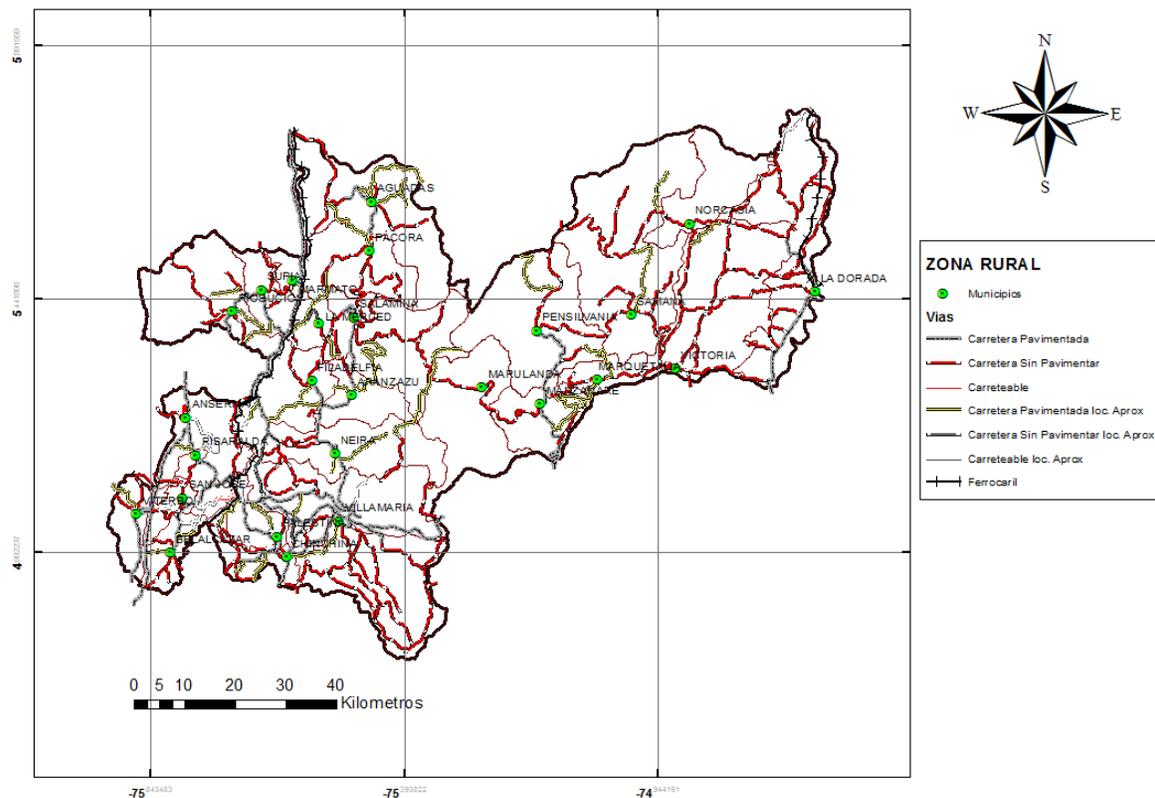
B. Anexo: Mapas de las ZNI y Red Vial para el Dpto. de Caldas

Anexo B1. Mapa de las zonas no susceptibles de Interconexión eléctrica para el Dpto. de Caldas



[Fuente: Elaboración propia].

Anexo B2. Mapa de la red vial para el Dpto. de Caldas



[Fuente: Elaboración propia].

Bibliografía

Abuadala, A.; Dincer, I. (2010). Efficiency evaluation of dry hydrogen production from biomass gasification. *Thermochimica Acta* 507-508, 127-134.

Alfonso, D.; Perpiñá, C.; Pérez-Navarro, A.; Peñalvo, E.; Vargas, C.; Cárdenas, R. (2009). Methodology for optimization of distributed biomass resources evaluation, management and final energy use. *Biomass and bioenergy* 33, 1070-1079.

Anaya, J.; Chuvieco, E.; Palacios, A. (2008) Aerial biomass estimation in Colombia based on MODIS images. *Revista de Teledetección* 30, 5-22.

Andersen, R.; Towers, W.; Smith, P. (2005). Assessing the potential for biomass energy to contribute to Scotland's renewable energy needs. *Biomass and Bioenergy* 29, 73–82.

Andrade, G.; Pérez-Navarro, A.; Alfonso, D.; Perpiña, C.; Tamayo, Y.; Rojas, L.; Armas, R.; Gómez, A.; Peñalvo, E. (2009). Metodología para el aprovechamiento energético de biomasa en Cuba. *Unfiled P 40*.

Argote, K.; Reymondin, L.; Jarvis, A. (2011). Uso de datos MODIS en el monitoreo de cambios en la cobertura vegetal, Junio.

Beccali, M.; Columba, P.; D'alberti, V.; Franzitta, V. (2009) Assessment of bioenergy potential in Sicily: AGIS-based support methodology. *Biomass And Bioenergy* 33, 79–87.

Cabrera, G. (2007). Introducción a las plantas de generación de exergía y su valoración, Universidad del Valle, Agosto – Diciembre.

Carrillo, P. (2007). Estudio comparativo de bosques latifoliados del área de manejo y conservación del Río Bravo, Belice: Con énfasis en impactos de manejo forestal. Torrialba (Costa Rica), 85.

Carvacho, B.; Sánchez, M. (2010). Comparación de índices de vegetación a partir de imágenes MODIS en la región del Libertador Bernardo O'Higgins, Chile, en el periodo 2001-2005 Publicaciones de la Universidad de Sevilla.

Casas, Y.; Morales, M. (2009). Análisis termodinámico y exergético del proceso de producción de hidrógeno mediante la reformación con vapor de etanol subproducto de la caña de azúcar. Centro Azúcar Cuba 36(1), 16-23.

Castro, J.; Hernández, O. (2010). Definición de características técnicas y económicas de tres zonas no interconectadas de Colombia para la implementación de fuentes renovables de energía, Universidad de la Salle, Bogotá, D.C.

Cengel, A.; Wood, B.; Dincer, I. (2002). Is bigger thermodynamically better? Exergy, an International Journal 2, 62-68.

Cengel, Y.; Boles, M. (2009). Termodinámica. McGraw Hill/Internacional Editores, S.A. Edición 6. México, D.F.

Chuvieco, E. (2000). Fundamentos de Teledetección espacial, ediciones RIALP S.A. Madrid Patterson MW, 468.

Cosic, B.; Stani, Z.; Dui, N. (2010). Geographic distribution of economic potential of agricultural and forest biomass residual for energy use: Case study Croatia. Energy XXX 1-12.

Da Silva, D.; Caron, B.; Behling, A.; De Souza, V.; Eloy, E. (2012). Ponto de amostragem ao longo do fuste para estimativa do poder calorífico da madeira. Ciencia Rural, Santa Maria 42 (9), 1588-1595.

Delvalle-Arango, J. (2000). Consideraciones estructurales de los bosques de guandal del pacífico sur colombiano. *Rev. Fac. Nat. Agr. Medellín* 53 (2), 1011-1042.

Dimakis, A.; Biberacher, M.; Dominguez, J.; Fiorese, G.; Gadocha, S.; Gnansounou, E.; Guariso, G.; Kartalidis, A.; Panichelli, L.; Pinedo, I.; Robba, M. (2010). Methods and tools to evaluate the availability of renewable energy sources. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 1137,1-19.

Espejo, C. (2004). La energía eólica en España. *Investigaciones Geográficas* 35, 45-65.

Espejo, C.; Capel, J. (2007). El gas en la producción de electricidad en España. *Nimbus España* 19-20, 72-97.

ESRI - Environmental Systems Research Institute. Página de internet (www.esri.com).

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 estructura institucional, *CuadAdm. Bogotá (Colombia)* 22 (38), 219-245.

Francois, J. (2011). *Aplicaciones del sensor MODIS para el monitoreo del territorio – Primera Edición*. Mexico.

Funes, F.; Martín, J.; Blanco, D.; Reyes, F.; Cepero, L.; Rivero, J.; Rodríguez, E.; Sauran, V.; Del Valle, Y.; Calan, M.; Vigil, M.; Sotolongo, J.; Boillat, S.; Sanchez, J. (2011). Evaluación inicial de sistemas integrados para la producción de alimentos y energía en Cuba. *Pastos y forrajes* 34 (4), 445-462.

García, R.; Pizarro, C.; Lavín, A.; Bueno, J. (2012). Characterization of Spanish biomass wastes for energy use. *Bioresource Technology* 103, 249-258.

García-Santander, L. (2010). *Energías Renovables* Universidad de Concepción de Chile. Sept 07.

González, A. (2010). Comparación de energía y gases de efecto invernadero en calentamiento de agua para cocción de alimentos con electricidad y gas natural.

ASADES. Avances en energías renovables y medio ambiente 14, Impreso en Argentina.

Hernández, L. (2001). Densidad de biomasa aérea en bosques extensos del Neotrópico húmedo. Caso de la Cuenca del Río Caura, Venezuela. Revista Forestal Iberoamericana Vol. 1 N° 1, Centro de Investigaciones Ecológicas de Guayana. Versión 9-7.

Hourné, M.; Brito, M.; Del Castillo, A.; Fraga, E.; Díaz, A. (2012). Análisis de criticidad de grupos electrógenos de la tecnología Fuel Oil en Cuba. Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias 21 (3), 55-61.

Iannelli, L.; Gil, S. (2012). Acondicionamiento técnico de aire usando energía geotérmica – Ondas de calor. Lat. Am. J. Phys. Educ 6 (1), 489-511.

IGAC (Instituto Geográfico Agustín Codazzi) Página de internet (www.igac.gov.co).

IPSE (Instituto de Planificación y Promoción de Soluciones Energéticas Para zonas No Interconectadas) Diagnóstico y plan de acción para zonas no interconectadas (ZNI) Mauricio Cárdenas Santamaría ; Ministro de Minas y Energía. Bogotá D.C., Octubre 13 de 2011.

Karamarkovic, R.; Karamarkovic, V. (2010). Energy and exergy analysis of biomass gasification at different temperatures. Energy 35, 537-549.

Katz, R. (2001). Efectos ambientales de la sustitución de carbón por petcoke en la generación eléctrica y procesos industriales, ambientales y desarrollo XVII (1), 22-29.

Lillesand, T.; Kiefer, R.; Chipman, J. (2004). Remote Sensing And Image Interpretation. Sixth Edition, John Wiley & Sons, 763.

Linkohr, R. (2006). La política energética Latinoamericana, entre el Estado y el mercado 204, 90-103.

López, O. (2013). Aprovechamiento y uso de madera obtenida de entresacas de plantaciones forestales (www.revista-mm.com).

Loyola, E.; Castillo-Salgado, C.; Nájera-Aguilar, P.; Vidaurre, M.; Mojica, D.; Martínez-Piedra, R. (2002). Los sistemas de información geográfica como herramienta para monitorear las desigualdades de salud. *Rev PanamSaludPublica/Pan Am J Public Health* 12(6).

LP DAAC – Land Processes Distributed Active Archive Center, USGS – Science for Changing World, (<http://lpdaac.usgs.gov>).

Marcos, E.; Calvo, L.; Marcos, J.; Taboada, A.; Garcia-Mares, Reyes. (2008). Influencia del dosel arbóreo en las características químicas del suelo. Análisis comparativo de suelo bajo robledales, hayedos y pinares. *Actas de la II reunión sobre suelos forestales. Cuad. Soc. Esp. Cienc. For.* 25, 287-292.

Martínez, A.; Casals, M. (2002). Cálculo de la exergía química específica de combustibles sólidos, líquidos y gaseosos. *Revista Cubana de Química* XIV (3).

Mendoza, J.; Bula, A.; Gómez, R.; Corredor, L. (2012). Análisis exergético de la biomasa. *Información Tecnológica* 23(5), 85-96.

Mérida, L. (2012). Energía geotérmica en Guatemala. V convención de energía renovable y eficiencia energética.

Miranda, M.; Arranz, J.; Rojas, S.; Montero, I. (2009). Energetic characterization of densified residues from Pyrenean oak forest. *Fuel*. 88, 2106.

Morán, M.; Shapiro, H. (2004). *Fundamentos de Termodinámica Técnica*. Editorial Reverté, S.A. España, Barcelona. 309-315.

Nhuchhen, D.; Salam, A. (2012). Estimation of higher heating value of biomass from proximate analysis: A new approach. Energy Fields os Study, Asian Institute of Technology, P.O. Box 4, KlongLuang, Pathumthani 12120, Thailande.

Palau, A.; Prieto, C. (2009). Hidroelectricidad, embalses y cambio climático. "Ingeniería del agua" 16 (4), 311-324.

Panopoulos, K.; Fryda, L.; Karl, J.; Poulou, S.; Kakaras, E. (2006). High temperature solid oxide fuel cell integrated with novel allothermal biomass gasification Part II: Exergy analysis. Journal of Power Sources 159, 586–594.

Paruelo, J.; Garbulsky, M.; Guerschman, J.; Jobbagy, E. (2004). Two decades of normalized difference vegetation index changes in south america: identifying the imprint of global change. INT. J. Remotesensing 25(14), 2793–2806.

Paruelo, J. (2008). Caracterización funcional de ecosistemas mediante sensores remotos. Ecosistemas 17 (3), 4-22.

Paruelo, J.; Guerschman, J.; Baldi, G.; Di Bella, C. (2004). La estimación de la superficie agrícola. Antecedentes y una propuesta metodológica. Asociación Interciencia, Caracas Venezuela 29 (08), 421-427.

Peña-Llopis, J. (2006). // Sistema de Información geográfica aplicados a la gestión del territorio. //España, Alicante, editorial Club Universitario, 310.

Perpiña, C.; Alfonso, D.; Pérez-Navarro, A.; Peñalvo, E.; Vargas, C.; Cárdenas, R. (2009). Methodology based on geographic information systems for biomass logistics and transport optimization. RenewableEnergy 34, 555–565.

Perpiñán, O.; Colmenar, A.; Castro, M. (2012). Diseño de sistemas fotovoltaicos. Energías Renovables. Censolar, España.

Política de bosques, documento CONPES N° 2834, Minambiente – DPN : UPA Santafé de Bogota, enero 1996.

Posso, F. (2002). Energía y Ambiente: Pasado, presente y future. Parte dos: Sistema Energético Basado en Energías Alternativas 7 (1-2), 54-73.

Prins, M. (2005) Thermodynamic analysis of biomass gasification and torrefaction. Technische Universiteit Eindhoven, 17-18.

Promis, A.; Cruz, G. (2009). Un método para estimar estructuras del dósel arbóreo e iluminación en el interior del bosque-fotografías hemisféricas. Revista Bosque Nativo 44, 12-15.

PROTOCOLO DE KIOTO (Japón), de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático, el 11 de Diciembre de 1997.

Ptasinski, K.; Prins, M.; Pierik, A. Exergetic evaluation of biomass gasification. Energy. Available on line. Article in press.

Reklaitis, G. (1989). Balance de material y energía. Primera edición. McGraw Hill. México.

Rodríguez, H. (2008). Desarrollo de la energía solar en Colombia y sus perspectivas. Revista de ingeniería. Universidad de los Andes Bogotá, Colombia.

Rügnitz, M.; Chacón, M.; Porro R. (2009). Guía para la determinación de carbono en pequeñas propiedades rurales -- 1. ed. -- Lima, Perú.: Centro Mundial Agroforestal (ICRAF) / Consorcio Iniciativa Amazónica (IA) 79.

Saidur, R.; Abdelaziz, E.; Demirbas, A.; Hossain, M.; Mekhilef, S. (2011). A review on as a fuel for boilers. Renewable and Sustainable Energy Reviews 15, 2262-2289.

Saidur, R.; Boroumandjazi, G.; Mekhilef, S.; Mohammed, H. (2012). A review on exergy analysis of biomass based fuels. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 16, 1217-1222.

Schlegel, B.; Gayoso, J.; Guerra, J. (2000). Manual de Procedimientos Muestreo de Biomasa Forestal, Estimación de la biomasa en bosques del tipo forestal siempre verde – Universidad Austral de Chile. Simposio Internacional Medición y Monitoreo de la Captura de Carbono en Ecosistema Forestales, Valdivia – Chile.

SIGOT (SISTEMA DE INFORMACION GEOGRAFICA PARA LA PLANEACION Y EL ORDENAMIENTO TERRITORIAL) Página de internet (www.sigotn.igac.gov.co).

Silvestrini, V. (2000). ¿Qué es la entropía? Tercera reimpresión. Grupo editorial Norma. Santafé de Bogotá.

SISTEMA DE INFORMACIÓN ELÉCTRICO COLOMBIANO, (www.siel.gov.co) de la UNIDAD DE PLANEACIÓN MINERO ENERGÉTICA, (www.upme.gov.co).

Sistema información eléctrico colombiano. Zonas no interconectadas, Disponible en: <http://www.upme.gov.co/zni/> consultado el 20/03/2013.

Song, G.; Xiao, J.; Zhao, H.; Shen, L. (2012). A unified correlation for estimating specific chemical exergy of solid and liquid fuels. *Energy* 40, 164-173.

Tello, E.; Amaral, E. (2009). Aplicación de tecnologías SIG para evaluación y selección de áreas prioritarias para el desarrollo de proyectos de energía eólica. Memorias VI Conferencia Internacional de Energía Renovable, Ahorro de Energía y Educación Energética - CIER 2009. Habana, Cuba, 136-137.

Uasuf, A.; Hilbert, J. (2012). El uso de la biomasa de origen forestal con destino a bioenergía en la Argentina, *Informes Técnicos Bioenergía* 1 (3),4-43.

UPME, (UNIDAD DE PLANEACIÓN MINERO ENERGÉTICA). Costos indicativos de generación eléctrica en Colombia, C-I-1759-00-01 abril de 2005.

UPME. (UNIDAD DE PLANEACIÓN MINERO ENERGÉTICA). Formulación de un programa básico de normalización para la aplicaciones de energías alternativas y difusión, ANC-0603-21-00 de 2003.

UPME. (UNIDAD DE PLANEACIÓN MINERO ENERGÉTICA). Informe mensual de variables de generación y del mercado eléctrico colombiano – Septiembre de 2013.

UPME. (UNIDAD DE PLANEACIÓN MINERO ENERGÉTICA). Plan energético 2006-2005 contexto y estrategia – 2007.

Valencia, A.; Calero, V.; Meneses, O. (2012). Plan de ordenación forestal sostenible de la cuenca hidrográfica del rio cajambre – Litoral pacífico –Valle del Cauca – Colombia. Capítulo I Caracterización, 74-200.

Van De Wyngard, H. (2012). Energía eólica. La generación eólica. Capitulo (4), 81-99.

Velázquez-Martí, B. (2006). Situación de los sistemas de aprovechamiento de los residuos forestales para su utilización energética. Ecosistemas 15 (1), 77-88.

Waring, R.; Coops, N.; Fan, W.;Nightingale, J. (2006). MODIS enhanced vegetation index predicts tree species richness across forested ecoregions in the contiguous U.S.A. Remote Sensing of Environment 103, 218–226.

Yin, C. (2010).Prediction of higher heating values of biomass from proximate and ultimate analyses. Fuel 90, 1128-1132.

Zhang, Y.; Li, B.; Li, H.; Zhang, B. (2012). Exergy analysis of biomass utilization via steam gasification and partial oxidation. Thermochemica Acta 538, 21-28.