

ARTÍCULO CIENTÍFICO

Determinación del potencial energético de la biomasa residual de guayaba (*Psidium guajava* L.) en Rocafuerte, cantón Ibarra, provincia de Imbabura

Armas Espinel Daniel Alexander¹

¹ FICAYA, Ingeniería Recursos Naturales Renovables

El fenómeno del calentamiento global, ha sido generado por el exceso de emisiones de gases de efecto invernadero que generan los combustibles fósiles, principalmente el petróleo. Por esta razón en la actualidad se busca la utilización de energías alternas como el aprovechamiento de la biomasa que no genera efectos adversos para el planeta ni para los seres vivos. Como objetivo general se menciona al evaluar el potencial energético de la biomasa residual de guayaba. Se trata de una investigación experimental y de campo realizada en la comunidad de Rocafuerte, cantón Ibarra, dentro de la provincia de Imbabura. La metodología varía según cada objetivo, el análisis dendrométrico se realiza en 30 árboles al azar en una plantación de esta especie, analizando la dendrometría de ramas y de la planta entera, con el fin de predecir el volumen de madera contenido en cada árbol. Para el análisis físico-químico se tomaron muestras del material vegetativo y se enviaron a un laboratorio especializado, donde se realizaron los análisis; elemental, proximal, poder calorífico y contenido de humedad. Para medir el potencial energético, se determinó el peso de residuo seco generado por poda, se elaboró una ecuación en la que intervienen los valores calculados en las fases anteriores de la investigación, y una comparación con la demanda energética en la comunidad rural de Rocafuerte. Como resultados del análisis dendrométrico, presentó que la forma y el volumen de las ramas en cada uno de los estratos se ajustan bien a una forma cónica. Las funciones de volumen calculadas poseen coeficientes de determinación considerados como altos y adecuados para su aplicación práctica, encontrando un volumen total promedio de 33,60 dm³; 0,03 m³/árbol. La caracterización de los materiales reportó un contenido de humedad inicial de 38 %. El análisis elemental reportó concentraciones de los siguientes elementos: C, H, N, S, CL dentro de los límites permisivos, recalcando que el bajo contenido de azufre (>0,1%) no generaría emisiones contaminantes de dióxido sulfuroso. El análisis proximal arrojó los siguientes contenidos: humedad 9,8%, cenizas 3,74%, y volátiles 77,43% el alto contenido de volátiles, indica que este tipo de residuo podría tener aptitud en procesos de combustión, gasificación o pirolisis, sobre todo la combustión. En cuanto al análisis de contenido energético del residuo, se obtuvo un PCI de 18424 kJ/kg. El potencial energético fue de 259,53 ton, del recurso valor obtenido asumiendo que se realizan tres podas al año. Este índice permite calcular la energía potencial disponible 1318,19 kW/h/año. El consumo anual de la comunidad se estima en 12000kW h, al determinar que los residuos estudiados generan 1328,19 kW h al año, se establece que esta biomasa alcanza a cubrir el 11% de la demanda energética.

Palabras Clave: Energías alternas, Biomasa, Bioenergía, Guayaba, potencial energético.

SUMMARY

Determination of the energy potential of waste biomass Guava (*Psidium guajava* L.) in Rocafuerte, canton Ibarra, province of Imbabura

Daniel Armas Espinel¹

¹ FICAYA, Renewable Natural Resources Engineering

The phenomenon of global warming has been generated by the excess of emissions of greenhouse gases generated by fossil fuels, mainly oil. For this reason nowadays it seeks the use of alternative energies such as biomass use that does not generate adverse effects for the planet neither for living beings. As a general objective it is mentioned to evaluate the energy potential of waste biomass guava. This is about an experimental and field research conducted in the community of Rocafuerte, canton Ibarra, in the province of Imbabura. The methodology varies according to each objective; the dendrometrical analysis is performed on 30 random trees in a plantation of this species, analyzing the dendrometry of branches and the whole plant, in order to predict the volume of wood contained in each tree. For the physical-chemical analysis were taken vegetative material samples and they were sent to a specialized laboratory where analysis were performed; elementary, proximal, heating power and moisture content. For measuring the energy potential, it was determined by the weight of dry waste generated by pruning, it was elaborated an equation in which take part the calculated values in the previous phases of research, and a comparison with the energy demand in the rural community of Rocafuerte. As results of dendrometrical analysis, it shows that the shape and volume of the branches in each of the layers fit well with a conical shape. The calculated volume functions have coefficients of determination considered high and suitable for practical application, finding a total volume average of 33.60 dm³; 0.03 m³ / tree. The characterization of materials reported an initial moisture content of 38%. The elemental analysis reported concentrations of the following elements: C, H, N, S, CL within the permissive limits, emphasizing that the low sulfur content (> 0.1%) will not generate pollutants sulfur dioxide emissions. Proximal analysis showed the following contents: moisture 9.8%, ash 3.74%, and volatile 77.43% high volatile content indicates that this type of waste could have proficiency processes combustion, gasification or pyrolysis, especially combustion. Regarding the calorific power was obtained the following result 18424 kJ / kg. The energy potential was 259.53 ton, the resource value obtained assuming hat three prunings are performed annually. This index allows calculating the potential energy available 1318.19 kW h / year. The annual consumption of the community in 12000kW h, so that the guava waste could generate 1328.19 kW h per year, it is stated that this biomass is enough to cover only 11% of energy demand.

Keywords: Alternative Energy, Biomass, bioenergy, Guava, energy potential.

Introducción. - El fenómeno del calentamiento global, generado por el exceso de emisiones de gases de efecto invernadero, ha motivado en las últimas décadas un mayor interés en el estudio de sus determinantes. Durante las últimas décadas, la gran demanda y consumo de combustibles fósiles, ha hecho considerar y reconocer que el petróleo es un recurso finito y ante el contexto de su próximo agotamiento, el ser humano debe buscar fuentes de energías alternas, para satisfacer sus necesidades básicas. Por lo cual el aprovechamiento de las biomásas, se transformará en una verdadera alternativa al alcance del ser humano y en especial sin que genere efectos adversos, ni para el planeta, ni para los seres vivos (Escalante & Orduz, 2011), (Zilio, 2008). En el Ecuador durante los últimos años, se ha hecho eco sobre la necesidad de adoptar e implementar estrategias energéticas distintas a las tradicionales, el Ministerio de Agricultura Ganadería Acuicultura y Pesca (MAGAP), las instituciones educativas de tercero y cuarto nivel tanto públicas como privadas, han incrementado sus esfuerzos investigativos para encontrar alternativas energéticas con el aprovechamiento de diversas biomásas (MEER, 2014). Ecuador posee un potencial energético de residuos agrícolas en cultivos como el maíz, la caña de azúcar, arroz y banano (García et al, 2012). En Imbabura, en la vía Ibarra-San Lorenzo existen amplias zonas destinadas a plantaciones de guayaba, que no tiene un adecuado manejo de la biomasa residual generada en podas, que puede ser aprovechada continuamente al ser un recurso totalmente renovable se aseguraría una constante y suficiente dotación de materia prima para generar energías alternativas, de esta manera reducir las emisiones de CO₂ a la atmosfera, y contribuir a mejorar la calidad de vida de los habitantes de estas comunidades (FOCER, 2002), (Zilio, 2008).

La presente investigación se realizó en la comunidad de Rocafuerte ubicada dentro de la parroquia Lita, cantón Ibarra, provincia de Imbabura presenta características edafoclimáticas óptimas para que proliferen el cultivo de la guayaba. Es una faja montañosa con un gradiente altitudinal entre los 700 a 900 m snm. Pertenece a la zona de vida bosque muy húmedo Pre-Montano, su temperatura promedio anual es de 18 a 24 ° C presentando un clima Ecuatorial Cálido y recibe entre 2.000 y 4.000 milímetros de lluvia anual.

Como objetivo general se plantea, evaluar el potencial energético de la biomasa residual de guayaba (*Psidium guajava L*) en Rocafuerte, cantón Ibarra, provincia de Imbabura. Los objetivos específicos, están dirigidos a analizar la biomasa de la (*Psidium guajava L*), a través de un proceso dendrométrico; a caracterizar la biomasa residual de la guayaba a través de un análisis físico químico y por último se plantea medir el potencial energético de la biomasa de especie estudiada. La pregunta que direccionó la presente investigación fue: ¿En la zona específica de estudio, tiene la biomasa residual un potencial energético que permita la generación de energía sostenible?

Metodología, En el área de estudio se procedió a realizar el análisis de la biomasa de la guayaba (*Psidium guajava L*), a través de un proceso dendrométrico, para cuantificar la biomasa mediante el muestreo de 30 árboles al azar en una plantación de guayaba, se inicia con el análisis dendrométrico de ramas, en el cual se seleccionaron 30 ramas, una por cada árbol o unidad experimental, a las que se realizaron las mediciones del diámetro de la base, longitud de la rama, diámetros a distintas longitudes (cada 10 cm). Los datos del diámetro de la base se obtuvieron a través de la medición con un pie de rey digital y la longitud de la rama se obtuvo las mediciones con una cinta métrica en cm. Para el cálculo del volumen real de una rama, se dividió la rama en partes iguales (10 cm), tal como se indica en la Figura 1; se midió el diámetro ecuatorial de la sección de forma, obteniendo el diámetro

inicial y final de cada intervalo, la suma de todos los volúmenes de cada una de las porciones calculadas fue el volumen real de la rama.

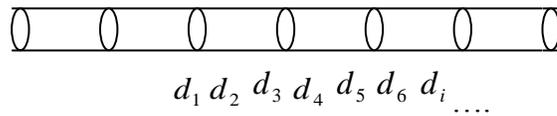


Figura 1. Mediciones de diámetros cada cierto intervalo (Borja Velázquez , 2006).

Para el análisis dendrométrico de la planta entera se utilizó el diámetro de tronco (cm); diámetro de copa (m); altura de la copa al suelo (cm) y altura del árbol (m), de lo cual se pudo identificar los estratos de las ramas de la planta de guayaba. El primer estrato estuvo constituido por las ramas de la base de la copa, a las cuales se midió su diámetro y su longitud, que por lo general fueron en número reducido (2 - 4 ramas) y de mayor diámetro. El segundo estrato estuvo constituido por las ramas que se ramificaron del primer estrato; se contabilizaron todos ellos (ocurrencia: veces que se repite la rama en un mismo estrato) para determinar el volumen de biomasa; luego, se seleccionó el más representativo, al que se midió su diámetro y su longitud. Seguidamente se cubico el tercero y cuarto estrato siguiendo la misma metodología descrita para el segundo estrato.

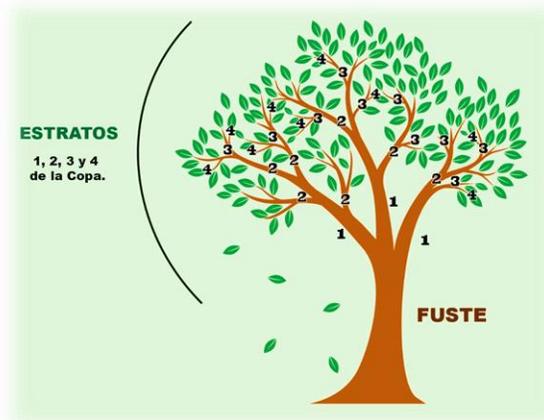


Figura 2. Distribución del árbol por estratos

Al determinar el coeficiente de forma de la guayaba, se calculó el volumen real de todas las ramas existentes en cada estrato y se estimó el volumen real que ocupa todo el árbol. Se determinó el volumen real del árbol entero y por estratos, analizando su evolución según la edad, diámetro y altura de la copa, representando en cuadros y gráficas que muestran la distribución de biomasa por estratos en la copa. Se determinó si existe tendencia a la concentración de la biomasa en uno o más estratos. Se confeccionaron gráficos y tablas que ayuden a la visualización de la supuesta concentración de biomasa. Se determinó el volumen aparente de las copas, determinado por su diámetro y la altura media de las mismas que va desde la base al ápice. La finalidad fue relacionar el volumen aparente (materiales y huecos) con el volumen real del material contenido en la copa (madera, hojas y frutos). El diámetro de la copa es un promedio de dos segmentos que se intersectan en el centro de la proyección de la copa formando un ángulo de 90° . El diámetro y la altura media de las copas darán diferentes modelos geométricos de volumen aparente que se relacionó con el volumen real, y a través de la densidad con la biomasa.

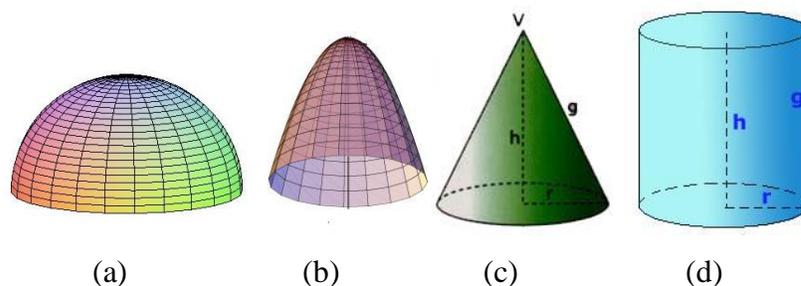


Figura 3. Modelos de crecimiento de copas arbóreas en una superficie determinada: (a) Semi-elipse, (b) paraboloides, (c) crecimiento cónico, (d) crecimiento cilíndrico (Borja Velázquez, 2006).

La caracterización de la biomasa residual de la especie se la hace mediante análisis físico químicos, debido a la complejidad de los análisis, las muestras del material fueron enviadas por medio del correo institucional de la Universidad Técnica del Norte hacia el Laboratorio de la Universidad de Ciencias de la Vida en Praga República Checa. Para preparar el envío de las muestras se seleccionaron los tallos más gruesos, los cuales se trocearon en tarugos más pequeños con la ayuda de una cierra de banda industrial para disminuir la pérdida de material. La muestra fue empacada en fundas plásticas negras, selladas herméticamente y enviadas al laboratorio donde se realizaron los análisis; elemental, proximal y de poder calorífico.

El análisis elemental reportó los porcentajes en peso de los elementos que constituyen la biomasa, como son el oxígeno (O₂), carbono (C), hidrogeno (H), azufre (S) y nitrógeno (N), que por lo general son los elementos con mayor presencia en la estructura molecular de la materia orgánica, aunque los demás elementos interesan asimismo en ajustes tecnológicos. Para realizar estos análisis se empleó el determinador de Carbón /Hidrogeno/ Nitrógeno, LECO® 628.

El análisis próximo: Contempló evaluar la humedad, el material volátil, y las cenizas. El equipo utilizado para este análisis fue un equipo termogravimétrico para análisis próximo TGA-2000AD. Para llevar a cabo este análisis se aplican las normas (ASTM E87282, E1755-01)

Poder Calorífico: Es la energía química del combustible que puede ser transformada directamente en energía térmica mediante un proceso termoquímico de oxidación. Las determinaciones se realizaron en base seca, por tanto, el (PCI) es la variable que permite cuantificar la energía liberada. Se utilizó un Calorímetro IKA C-6000. Aplica la norma (ASTM D5468-02, E711-87).

El análisis de contenido de humedad se lo realizó en el laboratorio de análisis químicos físicos y biológicos de la Facultad de Ciencias Agropecuarias y Ambientales, de la Universidad Técnica del Norte posterior a la poda. Para realizar este análisis el material de ramas de guayaba tuvo que ser cortado y triturado previamente, ya en el laboratorio se prepararon 3 muestras en recipientes separados con 100 g de material cada una obteniendo el peso húmedo (Ph). Posteriormente, se calentó la estufa eléctrica marca Memmert a una temperatura entre 103 y 105°C donde se colocaron las muestras. Se volvieron a pesar cada dos horas hasta obtener un peso constante, determinando así la pérdida total de humedad (Ps) (ASTM E1756-01) (Viscarra, 1998).

Muestreo de la biomasa: Para la medición del potencial energético de la biomasa de Guayaba, al ser esta una especie de regeneración natural, o silvestre en la zona de estudio, la última encuesta de superficie y producción agropecuaria continua ESPAC menciona a la guayaba dentro de la categoría *árboles dispersos cosechados*, pero no contiene datos como densidad de árboles por hectárea, superficie de producción, por esta razón fue necesario definir la metodología para el muestreo de la biomasa.

Conociendo la heterogeneidad en cuanto a la dispersión de la especie investigada, para estimar la cantidad de biomasa generada, se procedió a realizar inventarios forestales en 5 hectáreas al azar. Se aplicaron encuestas a los propietarios de parcelas en las que existía una considerable cantidad de árboles de guayaba, para estimar la superficie total destinada a la producción de este frutal.

Para estimar la muestra, fue necesario aplicar el método de *Análisis Clúster*, que es un procedimiento estadístico multivariante que comienza con una serie de datos, que contienen información sobre una muestra de objetos e intenta reorganizarlas en grupos relativamente homogéneos (Muñuzuri Sanz & Lara Albín, 2014). Es así que, mediante los clústers, se establecieron 3 superficies en donde se concentran la mayor densidad de árboles, encontrando de 10 a 12 individuos en cada una, en base a esto se definió la muestra de los 3 clústers.

Para determinar la cantidad de biomasa residual disponible, se trabajó con la muestra previamente establecida de los 3 clústers teniendo que evaluar 30 árboles, a los cuales, para favorecer la regeneración de ramas, la floración y fructificación, se les realizó podas de mediana intensidad, de los siguientes tipos (Quijada et al, 2009).

- La poda de despunte consiste en eliminar de 10 a 15 cm desde el ápice de las ramas en toda la copa de la planta.
- La poda central consiste en eliminar las ramas de la parte central de la planta, dejando solo las ramas laterales.
- La poda fitosanitaria de clareo donde se debe eliminar ramas agotadas, secas, mal formadas y/o dañadas.

Se podaron 6 árboles por día, el proceso total se lo llevó a cabo durante cinco días con el apoyo de tres operarios. Según la bibliografía citada se recomienda realizar de dos a tres podas al año Quijada et al. (2009).

Localización de los recursos: Frente a la falta de información local disponible se aplicaron encuestas a los propietarios de las fincas donde se observó gran densidad de árboles de guayaba y a otros informantes calificados. Se obtuvieron las coordenadas de ubicación de los predios, realizando polígonos de ubicación de los mismos para determinar con más exactitud la superficie exacta destinada a los cultivos silvestres de guayaba.

Calculo de la cantidad de recurso y capacidad energética: Con la información obtenida en etapas anteriores se calcularon los siguientes parámetros (Manrique et al, 2008):

- Índice de Productividad: calculado como producto obtenido por hectárea (kg) en promedio en la zona.

- Superficie total cultivada en hectáreas: se calculó el promedio de la superficie basado en las encuestas realizadas
- Energía potencial disponible en la zona: su potencial energético puede ser determinado por un modelo matemático definido como el producto entre: peso seco del residuo, número árboles por hectárea, total de hectáreas y poder calorífico inferior, la ecuación es la siguiente:

$$PE = [Pbr * N] * Th * PCI$$

En donde:

PE = Potencial energético (J)

Pbr = Peso seco biomasa residual (g)

N = Numero de árboles/ha

Th = Total hectáreas

PCI = Poder calorífico inferior (J/g)

3. Resultados y Discusión

El estudio se estructuró en 4 partes:

- Estudio dendrométrico de ramas.
- Análisis de la biomasa de la planta entera.
- Caracterización física química de la biomasa en laboratorio.
- Medición del potencial energético de la biomasa residual de guayaba.

Estudio Dendrométrico de ramas de Guayaba.

El objetivo del estudio dendrométrico de la guayaba, sirve para determinar el volumen de sus ramas en lo que respecta a su longitud y diámetro. Para ello se muestra el análisis unidimensional de las variables medidas en 30 ramas. En la tabla 5 se puede observar el resumen estadístico del volumen real de la rama, volumen modelo, diámetro de la base y longitud.

La Tabla 1 muestra resúmenes que incluye medidas de tendencia central, de variabilidad y de forma. De particular interés están la asimetría estandarizada y la curtosis estandarizada, valores que estuvieron dentro del rango (-2 y +2) los cuales demuestran que tienen una distribución normal de Gauss.

Tabla 1. Resumen estadístico de los parámetros estudiados en las ramas

	Volumen real (VR) (cm ³)	Volumen modelo (Vm) (cm ³)	Diámetro base (Db) (cm)	Longitud de la rama (L) (cm)
Media	362,34	1025,44	2,42	218,13
Desv. Típica	110,39	304,50	0,30	22,10
Coef. De Curtosis	0,98	0,16	0,40	-0,67
Coef. de Asimetría	1,60	0,41	-1,36	0,77
Máximo	669,16	1690,51	2,93	262,00
Mínimo	205,12	493,98	1,75	184,00

Para el análisis de la forma de la rama se evaluó el factor de forma, que fue la relación entre el volumen real y los diferentes volúmenes modelos, tales como: el cilindro, el paraboloides, el cono y el neiloide, obtenidos a partir de la base y la longitud de la rama. El factor de forma más cercano a uno (1) fue el que mejor representa su forma. Como se puede observar en la tabla 2, el modelo que proporcionó el volumen más próximo al real fue el cono (1,08).

Tabla 2. Cálculo de factores de forma en base a modelos geométricos estudiados

	F cilindro	F paraboloides	F cono	F neiloide
Media	0,36	0,72	1,08	1,44
Desviación tip.	0,05	0,11	0,16	0,22

A continuación, se analizó un modelo de cálculo del volumen real de la rama a partir de un modelo de regresión múltiple. Las variables explicativas presentan p-valores menores a 0,05 lo que le dio una significación del 99%. Se obtuvo un modelo de cálculo del volumen real de la rama a partir de un proceso de regresión múltiple, que sintetiza el conjunto de datos.

En la Tabla 3, se detalla la ecuación; en donde, la variable dependiente fue: VR, volumen real (cm³); las variables independientes, fueron: Db, el diámetro de la base (cm) y L, Longitud de la rama (cm).

Tabla 3. Modelo de regresión para las ramas de la guayaba

Ecuación	EMA (cm ³)	r ² (%)	P-Valor
VR = 9,69216 + 0,268298 × Db² · L	32.2146	96.17	< 0.05

EMA: error medio absoluto
r²: coeficiente de determinación
VR: Volumen de la rama
L: Longitud
Db: Diámetro de la base

El coeficiente de determinación r² indica que el modelo explica un 96.17 % de la variabilidad en VR, porcentaje considerado alto. Estos resultados son corroborados por Pacheco (2014), quien en el cálculo de modelos volumétricos en *Prunus pérsica* obtiene un coeficiente de determinación de 93%.

Análisis de la biomasa de la planta entera.

En esta parte se analizó la distribución de la biomasa por estratos, para calcular el volumen de la parte leñosa de la planta entera y por cada uno de los estratos de los árboles de guayaba.

En la Tabla 4, se indican los datos del diámetro medio, longitud media y volumen de las ramas que ocupan cada estrato. El volumen ocupado por cada una de las ramas en los diferentes estratos fue calculado a partir de la aplicación de las funciones de volumen anteriormente obtenidas:

Ecuación volumen de ocupación

$$V_i = \frac{1}{3} \cdot \pi \cdot h \cdot (R^2 + r^2 + R \cdot r)$$

En la Tabla 4 se presenta la distribución de biomasa en la planta de guayaba, observándose la más baja concentración de biomasa en el primer estrato (11,48%), debido a que porta un reducido número de ramas y no tiene ocurrencias. La suma de los estratos restantes 2 (17,58%), 3 (18,88%), y 4

(18,12%) aportaron el (66%) de biomasa en la distribución del árbol de guayaba. Se encontró que la mayor cantidad de biomasa tuvo lugar en el fuste (33,9%) debido a que presenta una medida promedio de altura desde la primera ramificación al suelo (Hcs) mayor a un metro (103 cm) y un diámetro de tronco promedio de (11,43 cm) como indica la figura 4.

Tabla 4. Promedios de la biomasa de ramas por estratos

	Diámetro de la base (cm)	Longitud (cm)	Volumen real (cm ³)
Estrato 1	7,566	73,616	116419,47
Estrato 2	5,117	75,966	178235,94
Estrato 3	2,854	82,993	191401,10
Estrato 4	1,5	63,5	183723,46

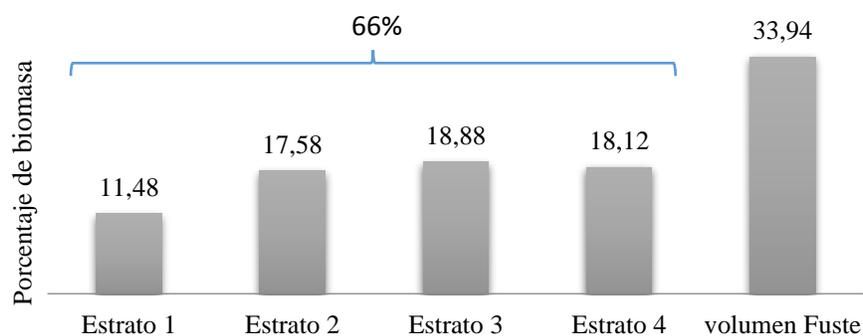


Figura 4.- Distribución de biomasa según estratos y fuste

En la Tabla 5, se presenta el análisis estadístico descriptivo de las dimensiones de los árboles estudiados y el volumen total calculado por árbol que fue de: 33596,6 cm³; 33,60 dm³; 0,03 m³. Esta tabla muestra el resumen estadístico para las diferentes variables; volumen real de la planta entera, volumen aparente del modelo cilíndrico, diámetro de copa, diámetro de tronco, altura de la planta, altura del suelo a la copa, y factor de ocupación. Incluye las medidas de tendencia central, medidas de variabilidad, y medidas de forma. De particular interés están la asimetría estandarizada y la curtosis estandarizada, valores que estuvieron dentro del rango (-2 y +2) los cuales demuestran que tienen una distribución normal de Gauss.

Tabla 5. Resumen estadístico de los parámetros estudiados de la planta entera

	Media	Desv. típica	Coef. de Curtosis	Coef. de asimetría	Máximo	Mínimo
Volumen real de la planta entera(cm ³)	33596,6	18899,9	-0,79	-0,09	85122,5	11673,1
Volumen aparente (modelo cilíndrico) (cm ³)	100,79	47,15	-1,18	-0,08	183,8	19,19
Diámetro de copa (cm)	498,77	112,35	-0,23	-1,23	662,0	260,0
Diámetro de tronco (cm)	11,21	2,05	1,11	1,89	17,0	8,7
Altura de planta (cm)	457,43	80,73	-0,55	-0,87	588,0	285,0
Altura del suelo a la copa (cm)	103,61	37,97	-0,29	-0,19	176,0	24,0
Factor de ocupación(cm ³)	425,80	186,62	-0,21	1,61	849,36	192,15

Por último, en la tabla 6, se presenta el valor medio y desviación típica del factor de ocupación (FO) de la especie, siendo $4,26 \text{ cm}^3/\text{dm}^3$ y $2,9 \text{ cm}^3/\text{dm}^3$ respectivamente. Este factor es la relación entre el volumen real del material lignocelulósico de la planta (en cm^3) y su volumen aparente (en dm^3). El volumen aparente es el de un modelo geométrico calculado a partir de su diámetro de copa y su altura total, generalmente el cilindro. Este cilindro teórico está formado por las ramas y los huecos existentes entre ellas. Los valores de FO suponen un factor de conversión para obtener el volumen real a partir del cálculo del volumen mediante el modelo del cilindro.

Tabla 6. Factor de ocupación de los árboles estudiados

	V real planta	D. copa	Ht	V cilindro aparente	FO
Árbol 1	30345,99	5,54	4,72	113,78	266,72
Árbol 2	39205,94	6,62	5,34	183,80	213,31
Árbol 3	56023,41	5,5	5,11	121,41	461,46
Árbol 4	40954,53	5,39	5,03	114,77	356,83
Árbol 5	18012,03	3,86	3,96	46,34	388,69
Árbol 6	113294,15	6,46	4,75	155,69	727,71
Árbol 7	62643,76	6,12	5,88	172,97	362,17
Árbol 8	54426,54	6,6	5,12	175,17	310,71
Árbol 9	49266,66	4,7	5,36	92,99	529,79
Árbol 10	18898,69	5	4,4	86,39	218,75
Árbol 11	23790,01	4,42	4,75	72,88	326,41
Árbol 12	48543,53	4,75	5,29	93,74	517,84
Árbol 13	28347,36	4,43	7,5	115,60	245,22
Árbol 14	85122,47	3,94	4,48	54,62	1558,41
Árbol 15	29722,91	6,4	4,8	154,42	192,49
Árbol 16	47535,60	5,76	5,68	148,01	321,17
Árbol 17	50379,68	6,2	4,1	123,78	407,00
Árbol 18	16247,76	2,6	3,87	20,55	790,76
Árbol 19	18170,17	5,1	5,84	119,30	152,31
Árbol 20	18770,65	5,2	4,6	97,69	192,14
Árbol 21	9643,01	2,85	2,66	16,97	568,26
Árbol 22	8825,72	3,55	3,35	33,16	266,17
Árbol 23	11909,40	6,05	5,18	148,91	79,98
Árbol 24	13994,52	3,75	3,5	38,66	362,02
Árbol 25	11673,08	2,65	3,48	19,19	608,17
Árbol 26	8544,72	2,12	2,85	10,06	849,36
Árbol 27	17544,69	5,54	4,77	114,98	152,59
Árbol 28	42575,27	5,1	4,17	85,19	499,79
Árbol 29	15366,29	5,16	3,2	66,92	229,63
Árbol 30	24041,24	3,3	4,5	38,49	624,63
Media	33793,99	4,82	4,61	94,55	426,02
Desviación	24279,72	1,28	1,01	51,61	290,20

Caracterización física química de la biomasa en laboratorio.

Los resultados que a continuación se detallan fueron obtenidos a partir de los análisis de laboratorio realizados en la *Facultad de Ciencias Agrícolas Tropicales de la Universidad de Ciencias de la Vida de Praga-Republica Checa*, donde se realizó la caracterización de las propiedades físico químicas de la muestra de guayaba *Psidium guajaba* L.

Análisis elemental de la composición de biomasa de guayaba.

En la tabla 7 se describe que del total de elementos presentes en la biomasa de guayaba el carbono se encuentra en una concentración mayor al porcentaje referido en bibliografía. El hidrógeno y azufre presentan concentraciones estimadas dentro de los límites de referencia. Por el contrario de los porcentajes de nitrógeno que están presentes en cantidades inferiores a lo que señala la bibliografía (San Miguel & Gutiérrez Martín, 2015).

Tabla 7. Composición elemental de macroelementos

Elemento	% experimental	% de referencia
Carbono	49,64	(43-48%)
Hidrógeno	5,99	(5,5 - 6,5%)
Nitrógeno	0,68	(1,5 – 5%)
Azufre	0,063	(< 0,1%)

La tabla 8 indica que elementos como: Ca, Na, K, Cl, I, Mg y Fe son esenciales pero sus concentraciones en sumatoria no supera en 3,9 % de la biomasa (en base seca), constituyéndose en sales o moléculas específicas. Los restantes elementos descritos en la tabla se consideran como oligoelementos y constituyen el 0,1 % del total de la biomasa. Según los resultados obtenidos se evidencia que las concentraciones de los micro y oligoelementos de la biomasa de guayaba están presentes en las concentraciones citadas en la bibliografía (San Miguel & Gutiérrez Martín, 2015), (Marín et al, 2015).

Tabla 8. Composición elemental de micro elementos

Elemento	% encontrado	% de referencia
Silicio (Si)	0,213	
Zinc (Zn)	0,002	
Calcio (Ca)	1,155	
Cloro (Cl)	0,226	
Fosforo (P)	0,036	La sumatoria de las concentraciones de estos micro elementos no son mayores a 4%
Potasio (k)	2,137	
Azufre (S)	0,063	
Molibdeno (Mo)	0,002	
Circonio (Zr)	0,002	
Cadmio (Cd)	0,003	
Antimonio (Sb)	0,003	
Total	3,842	

Análisis proximal de la composición de biomasa de guayaba:

En la tabla 9 se describe los resultados obtenidos expresados en porcentaje (%) cabe recalcar que las pruebas fueron realizadas en estado seco, y se establece que el contenido de humedad es $> 10\%$. Los resultados reflejan que la concentración de material volátil + cenizas (86,46%) se traduce a que este material sería adecuado para un proceso de gasificación para la obtención de gas sintético, es decir un proceso de calentamiento en ausencia de oxígeno para la obtención de un gas volátil combustible.

La madera contiene generalmente 1% de cenizas, algunas especies pueden tener un porcentaje de cenizas mayor (FAO, 2014), este es el caso de la guayaba que contiene 3,74%. Un elevado porcentaje de cenizas predice una disminución en su poder calorífico. Por esta razón se señala que el material es apto para utilizarse con aditivos como parafina para mejorar su poder calorífico y ser usado como pellets y briquetas en procesos de combustión directa (Borja Velázquez, 2006).

Tabla 9. Resultados del análisis proximal de la biomasa de guayaba

Pruebas	Promedios (%)
Humedad	9,80 %
Cenizas	3,74%
Material volátil	77,43%
Carbono fijo	9,03%
PCI	18,42 (J/g)

Contenido de humedad y curva de secado:

El contenido de humedad de una muestra es la diferencia que existe entre el peso en estado húmedo y el peso en seco, la Tabla 10, hace mención al porcentaje de humedad presente en las muestras recién cortadas que fueron sometidas al secado en estufa a temperatura entre 103 y 105° C. En la que se reporta el valor promedio de 38,2% de humedad de las tres muestras.

Tabla 10. Porcentaje de humedad

Muestra	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3	Media
Peso inicial (g)	100	100	100	100,0
Peso final (g)	61,8	61,6	61,4	61,7
Porcentaje de humedad (%)	38,2	38,4	38,1	38,2

En la figura 5, muestra la curva de secado, se evidencia una mayor intensidad de evaporación durante las dos primeras horas, durante la tercer y cuarta hora la velocidad de secado decrece. A partir de la sexta hora se registran pesos constantes demostrando la ausencia de humedad.

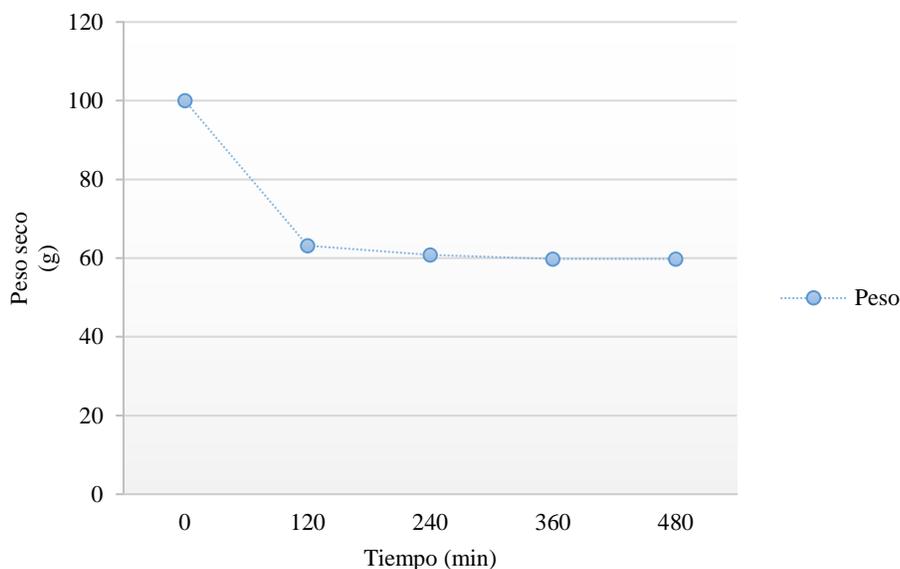


Figura 5. Curva de secado de biomasa de guayaba

Muestreo de biomasa:

La tabla 11, detalla los resultados obtenidos luego de cada inventario forestal realizado, fueron cinco las repeticiones, obteniendo una media de 120 árboles por hectárea. Este resultado se ajusta a las características heterogéneas en cuanto a la distribución espacial de la especie, los árboles tienen una separación aproximada de 9 x 9 metros. Se debe recalcar que en el presente estudio se tomaron en cuenta, únicamente a las poblaciones de mayor densidad de árboles, más no a los árboles con mayor dispersión, ni aquellos que conforman parte de cercas vivas.

Tabla 11.- Inventario forestal, número de árboles por hectárea

Área	Árboles
Hectárea 1	115
Hectárea 2	123
Hectárea 3	125
Hectárea 4	97
Hectárea 5	140
Media	120

En la Tabla 12 muestra los resultados de la poda que se realizó a la muestra establecida de 30 árboles. Se detalla el valor total y promedio de los pesos expresados en kilogramos de ramas y hojas por separado, y luego el total del residuo húmedo y seco.

Tabla 12. Biomasa residual disponible

30 Árboles	Peso Ramas [Kg]	Peso Hojas [Kg]	RHT [Kg]	RST [Kg]
Total	296,63	135,85	432,48	266,96
Media	9,89	4,53	14,42	8,90

La biomasa residual estuvo constituida por el 31% de hojas y el 69% de ramas como indica la figura 6. Las características similares de los residuos permitieron definir al conjunto de estos como biomasa residual total.

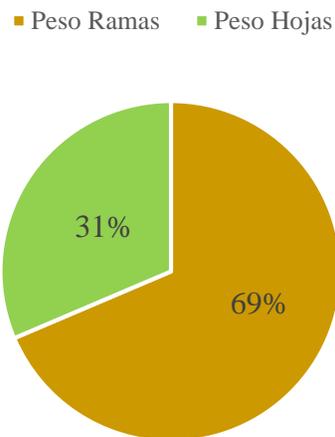


Figura 6. Distribución de la biomasa residual

Después de haber determinado el contenido de humedad de la biomasa residual, se pudo obtener el peso seco del material que es el residuo de interés energético aprovechable. La figura 7 indica los valores del residuo húmedo y seco siendo 8,9 kg el valor aprovechable por árbol.

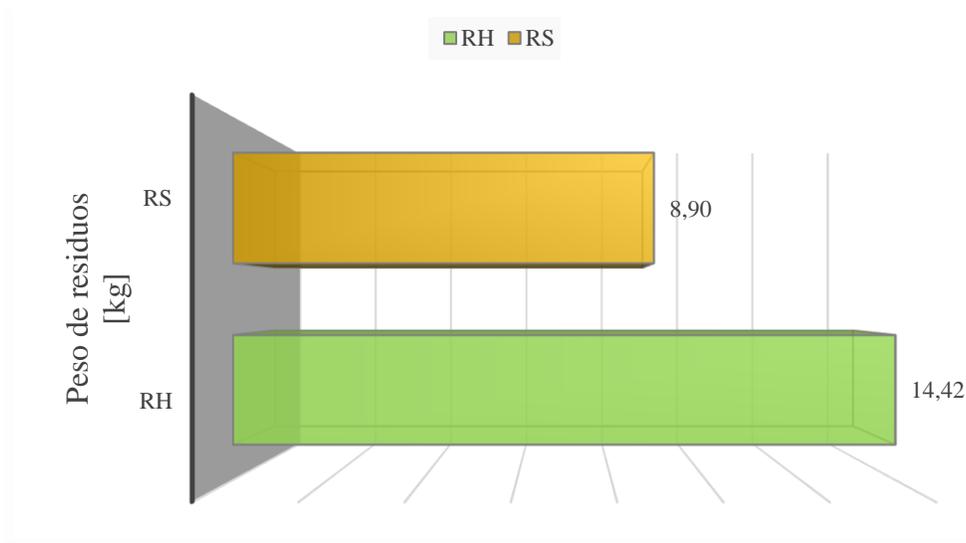


Figura 7. Peso de residuos húmedo y seco

Habiendo obtenido 8,9 kg de residuo aprovechable por árbol, se pudo determinar la cantidad de residuo generada por hectárea de cultivo, y a su vez la cantidad total de residuo potencialmente aprovechable dentro en la zona de estudio, estos datos se detallan en la Tabla 13.

Tabla 13. Biomasa potencial disponible

Peso/árbol [Kg]	Peso/muestra [Kg]	Peso/hectárea [Kg]	Peso total [Kg]
8,9	266,96	1068	86508

Potencialidad Energética de los Recursos:

Luego del trabajo de campo, se estimó una superficie promedio total de 81 hectáreas con mayor densidad de la especie. Además, se observó la existencia de poblaciones dispersas distribuidas en pastizales, potreros y cercas vivas, a lo largo de la comunidad. De las 346,71 ha que tiene Rocafuerte, el 23 % de su superficie corresponde al área de concentración de la especie estudiada.

La tabla 14 muestra la obtención de 86,51 toneladas por poda, asumiendo que al año se deben realizar tres podas, el total anual de biomasa residual disponible serían 259.53 toneladas de material seco. Al aplicar la ecuación 12, para la Determinación del potencial energético, se establece una disponibilidad de 442,73 kW h por poda, siendo 1328,19 Kw h la disponibilidad total con las tres podas.

Tabla 14. Potencialidad energética del recurso

Producción de Biomasa y Energía Potencial				
Parámetros	Poda 1	Poda 2	Poda 3	Total anual
Biomasa potencial disponible en la zona [ton/año]	86,51	173,02	259,53	259,53
Energía potencial disponible [Kw_h]	442,73	885,46	1328,19	1328,19

Demanda local de energía:

La población de la comunidad Rocafuerte es de 200 habitantes aproximadamente 40 hogares. El consumo energético de una familia en las zonas rurales es de 25 kW h mes, considerando que es el promedio de consumo que garantiza soportar un adecuado programa de mantenimiento de la red (Aréstegui et al, 2014).

El consumo anual de la comunidad se estima en 12000 kW h, al determinar que los residuos estudiados generan 1328,19 kW h, se establece que esta biomasa alcanza a cubrir el 11% de la demanda energética.

Conclusiones:

- Con el análisis dendrométrico de árboles de guayaba (*Psidium guajava* L.) se determinó que, la forma y el volumen de las ramas en cada uno de los estratos se ajustan bien a una forma cónica. El volumen total calculado por árbol fue de 0,03 m³. La biomasa de la planta entera se distribuye de forma irregular, siendo en los cuatro estratos donde se concentra el 66% de la biomasa de la planta y el restante 33,95% se encontró en el fuste.
- Dentro de los análisis físico-químicos de guayaba (*Psidium guajava* L.), se reporta que el contenido de humedad es de 38,2 %, en cuanto a los resultados del análisis elemental se encuentran concentraciones de elementos como: C, H, N y S, dentro de los rangos de referencia. Recalcando que por la baja concentración de azufre no produciría emisiones contaminantes de dióxido sulfuroso. Mediante el análisis proximal y contenido energético se determinó que el bajo porcentaje de cenizas, alto contenido de materia orgánica y PCI indican que este residuo es apto para producir energía en procesos de combustión directa.
- En cuanto a la determinación del potencial energético, se establece que el mejor escenario para el aprovechamiento de biomasa, es realizar tres podas al año obteniendo 259,53 [tonelada seca], cantidad que a su vez generaría 1328,19 [kWh] o 4781,48 [MJ] siendo este el potencial energético.
- La presente investigación permitió determinar que el adecuado manejo del cultivo de guayaba genera una considerable cantidad de biomasa residual, sus características encontradas la hacen apta para la elaboración de pellets o briquetas que podrían sustituir al carbón mineral para la cocción y calefacción.

Recomendaciones

- Se recomienda continuar con los estudios de cuantificación de biomasa en diferentes especies vegetales para aportar con investigaciones que permitan incrementar la producción científica tanto de la Carrera, como de la Facultad y la Universidad.
- Agilizar la instalación de los equipos de laboratorio en el nuevo parque tecnológico de la UTN, para continuar con estudios de esta índole que permita evaluar los aportes de otras fuentes de biomasa dentro de la región, a fin de crear una mejor oferta energética.
- Debido a qué en periodos de fructificación, la guayaba es abundante y mayormente desaprovechada, se debería estudiar sus características como recurso generador de metano en futuras investigaciones.
- Se recomienda utilizar este tipo de recurso biomásico como materia prima para la elaboración de briquetas o pellets, que podrían sustituir el carbón mineral para la cocción y calefacción.

Bibliografía:

- Aréstegui, M., Escobar, R., Bonfiglio, G., & Tarnawiecki, D. (2014). *Promoción del uso productivo de la electricidad en zonas rurales de Cajamarca*. Lima: Soluciones Prácticas.
- Borja Velázquez, M. (2006). *Aprovechamiento de los residuos forestales para uso energético* (Tercera ed.). (U. P. Valencia, Ed.) Valencia. Recuperado el 20 de Febrero de 2016
- Escalante, H., & Orduz, J. (2011). *Alas del Potencial Energético de la Biomasa Residual en Colombia*. Santander: Ediciones Universidad Industrial de Santander.
- Escobar, W. (2005). *Evaluación de la colección de trabajo de guayaba Psidium guajava L. del ICA-CORPOICA en Palmira*. Palmira: Universidad Nacional de Colombia.
- FAO. (24 de 02 de 2014). *Deposito de documentos de la FAO*. Recuperado el 01 de 03 de 2016, de FAO org: <http://www.fao.org/docrep/008/j0926s/j0926s06.htm>
- FOCER. (2002). *Manuales sobre energía renovable: Biomasa*. San Jose: BUN-CA.
- Manrique, S., Franco, J., Núñez, V., & Seghezzo, L. (2008). *POTENCIAL ENERGÉTICO DE BIOMASA RESIDUAL DE TABACO Y AJÍ EN EL MUNICIPIO DE CORONEL MOLDES (SALTA-ARGENTINA)*. Salta: Universidad Nacional de Salta.
- Marín López, A., Hernández Rangel, E., & Florez Quintero, J. E. (2015). Metodología didáctica para el análisis de datos cualitativos en investigaciones orientadas al aprovechamiento de biomasa. *Novo Tékhne, 1*(especial). Recuperado el 20 de feb de 2015
- MEER. (17 de 10 de 2014). *Ministerio de Electricidad y Energía Renovable*. Obtenido de Ministerio de Electricidad y Energía Renovable: www.energia.gob.ec/direccion-de-bioamasa-y-coogeneracion/
- Muñuzuri Sanz, J., & Lara Albín, J. (2014). *Técnicas de Clusterización PFC*. Madrid.
- Quijada, O., Ramírez, R., Castellano, G., Camacho, R., & Burgos, M. (Noviembre de 2009). Tipos de poda y producción de guayabo (*Psidium guajava L.*) en el municipio Baralt, estado Zulia, Venezuela. (I. N. Agrícolas, Ed.) *Revista UDO Agrícola*, 9(2), 304-311.
- San Miguel, G., & Gutiérrez Martín, F. (2015). *Tecnología para uso y transformación de biomasa energética*. Madrid: Ediciones Mundi-prensa.
- Viscarra, S. (1998). *Guía Práctica Para el Secado de Madera en Hornos*. Santa Cruz: BOLFOR.
- Zilio, M. I. (2008). Emisiones de dióxido de carbono en América Latina. Un aporte al estudio del cambio climático. *Red de Revistas Científicas de América Latina, el Caribe, España y Portugal*, 136.

