

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

FACULTAD DE CIENCIAS FORESTALES

SUBDIRECCIÓN DE POSGRADO



**FACTIBILIDAD DEL USO DE LOS RESIDUOS DEL
APROVECHAMIENTO FORESTAL PARA PROPÓSITOS
BIOENERGÉTICOS EN LA REGIÓN DE EL SALTO, DURANGO**

Por:

Ing. Juan Martín Villela Suárez

Como requisito parcial para obtener el grado de:

MAESTRÍA EN CIENCIAS FORESTALES

Linares, Nuevo León, México

Diciembre, 2015



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN
FACULTAD DE CIENCIAS FORESTALES
SUBDIRECCIÓN DE POSGRADO



**FACTIBILIDAD DEL USO DE LOS RESIDUOS DEL APROVECHAMIENTO
FORESTAL PARA PROPÓSITOS BIOENERGÉTICOS EN LA REGIÓN DE EL
SALTO, DURANGO**

Por:

Ing. Juan Martín Villela Suárez

Como requisito parcial para obtener el grado de:

MAESTRÍA EN CIENCIAS FORESTALES

COMITÉ DE TESIS

Dr. Oscar Alberto Aguirre Calderón

Director

Dr. Eduardo Treviño Garza

Asesor

Dr. Marco Aurelio González Tagle

Asesor

Dr. Benedicto Vargas Larreta

Asesor Externo

Linares, Nuevo León, México

Diciembre, 2015

DEDICATORIA

A DIOS: Que ilumina cada paso que doy lleno de salud y bienestar

A MI PADRE: Al Sr. Martín Villela por educarme con los valores que afronto la vida y enseñarme que el estudio es parte importante del conocimiento de una persona

A MI MADRE: A la Sra. Silvia Suárez por el amor que día a día desde que nací ha demostrado hacia mí, por inculcarme la importancia de los valores y el gran esfuerzo que ha realizado para instruirme en la vida

A MIS HERMANAS: Brenda y Ale por su gran apoyo

A MIS SOBRINOS: Derek y Said, los quiero

Declaro que la presente investigación es original y se desarrolló para obtener el título de Maestría en Ciencias Forestales. Donde se utilizó información de varios autores, se otorgan los créditos correspondientes.

AGRADECIMIENTOS

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT): por la beca otorgada para la realización de mis estudios de maestría (Beca No. 306704).

A la Facultad de Ciencias Forestales de la UANL, por permitirme realizar mis estudios de maestría.

Al Dr. Óscar Alberto Aguirre Calderón, por transmitir sus conocimientos y experiencias profesionales, además de dedicar parte importante de su valioso tiempo para aclarar dudas, además de orientar, revisar y aporte de ideas en la elaboración y desarrollo de la presente investigación.

Al Dr. Eduardo Treviño Garza, por su disposición y asistencia en este trabajo de investigación, gracias también por el apoyo incondicional brindado como subdirector de posgrado.

Al Dr. Marco Aurelio González Tagle, por la amistad brindada y entera disposición en la revisión de las diferentes etapas del trabajo de investigación.

Al Dr. Benedicto Vargas Larreta, por la amistad que me ha brindado en las diferentes etapas de mi preparación académica. Gracias por los consejos y total disposición para enriquecer el desarrollo de la investigación.

Al Dr. Juan Gabriel Álvarez González, por su disponibilidad, amabilidad y aporte de ideas en el trabajo de investigación durante la estancia en la Universidad de Santiago de Compostela, Lugo, España.

A mis amigos y compañeros de generación, Martín, Jonathan, Perla, Geraldine, Sita, Marco, Gabriel, Israel, Silvette, Rubén, Carlos, por todos esos momentos agradables en los que convivimos juntos.

A mi amigo Roberto Flores Salas por su apoyo absoluto en la ejecución del trabajo de campo.

A todo el personal administrativo de la FCF por su entera disposición y amabilidad en todo momento.

ÍNDICE

ÍNDICE DE TABLAS	i
ÍNDICE DE FIGURAS.....	ii
LISTA DE UNIDADES.....	iii
LISTA DE SÍMBOLOS Y ABREVIATURAS.....	iv
RESUMEN.....	v
ABSTRACT	vi
1. INTRODUCCIÓN.....	1
2. OBJETIVOS	3
2.1. General.....	3
2.1.1. Particulares.....	3
3. HIPÓTESIS.....	3
4. REVISIÓN DE LITERATURA.....	4
4.1. Uso de la biomasa	4
4.2. Concepto de biomasa	4
4.3. Fuentes de biomasa forestal.....	6
4.4. Proceso de transformación de biomasa para fines energéticos.....	7
4.4.1. Calor y vapor	7
4.4.2. Combustibles gaseosos	7
4.4.3. Biocombustibles	7
4.4.4. Electricidad.....	8
4.4.5. Co-generación (calor y electricidad)	8
4.5. Bondades de la bioenergía	8
4.6. Contexto internacional de bioenergía	9
4.6.1. Consumo mundial de bioenergía	9
4.6.2. Escenarios mundiales de la bioenergía	10
4.7. Contexto de bioenergía en México	11
4.7.1. Situación en México	11
4.7.2. Escenarios de bioenergía en México.....	11
5. ESTIMACIÓN DE LOS RESIDUOS FORESTALES MEDIANTE EL USO DE RELACIONES ALOMÉTRICAS PARA LAS ESPECIES DE PINO Y ENCINO.....	13
5.1. RESUMEN	13

5.2.	ABSTRACT	14
5.3.	INTRODUCCIÓN	15
5.4.	MATERIALES Y MÉTODOS.....	16
5.4.1.	Área de estudio	16
5.4.2.	Base de datos	17
5.4.3.	Cuantificación del volumen de residuos	18
5.4.4.	Modelos utilizados.....	19
5.4.5.	Ajuste con variables dummy y comparación por pares entre las especies	19
5.4.6.	Parámetros estadísticos utilizados para medir el ajuste.....	21
5.5.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN	22
5.5.1.	Porcentaje de residuos forestales por especie	22
5.5.2.	Modelos para predecir el volumen de residuos forestales	27
5.5.3.	Disponibilidad de biomasa residual.....	31
5.5.4.	Comparación de la ecuación de volumen entre las especies.....	32
5.6.	CONCLUSIONES	35
5.7.	LITERATURA CITADA.....	36
6.	POTENCIAL ECONÓMICO DE LOS RESIDUOS FORESTALES PARA LA GENERACIÓN DE BIOENERGÍA	38
6.1.	RESUMEN	38
6.2.	ABSTRACT	38
6.3.	INTRODUCCIÓN	39
6.4.	MATERIALES Y MÉTODOS.....	40
6.4.1.	Disponibilidad total de residuos	40
6.4.2.	Potencial bioenergético de la biomasa forestal	41
6.4.3.	Cálculo de las emisiones de CO ₂ evitadas	41
6.4.4.	Análisis económico de la producción de bioenergía.....	41
6.4.5.	El criterio del valor actual neto (VAN)	42
6.4.6.	El criterio de la tasa interna de retorno (TIR).....	42
6.4.7.	Cálculos de extracción de biomasa	43
6.5.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN	44
6.5.1.	Volumen de residuos disponibles en la región por ejido.....	46
6.5.2.	Conversión del volumen de residuos forestales a energía eléctrica	47
6.5.3.	Reducción Potencial de GEI	50
6.5.4.	Determinación de los indicadores de rentabilidad	51
6.5.4.1.	Valor Actual Neto o Valor Neto Presente.....	53

6.5.4.2.	Tasa Interna de Retorno	54
6.6.	CONCLUSIONES	55
6.7.	LITERATURA CITADA.....	55
7.	CONCLUSIONES GENERALES.....	57
8.	BIBLIOGRAFÍA.....	57
9.	ANEXOS.....	61
	Anexo I: Parámetros estimados y estadísticos de bondad de ajuste del modelo completo ...	61
	Anexo II: Parámetros estimados y estadísticos de bondad de ajuste del modelo reducido ...	67

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Distribución de la muestra por especie.....	17
Tabla 2. Porcentaje de residuos por categoría diamétrica por especie	22
Tabla 3. Parámetros estimados y estadísticos de bondad de ajuste del modelo alométrico	28
Tabla 4. Prueba de F generalizada	33
Tabla 5. Ejidos evaluados en el estudio	40
Tabla 6. Volumen total por anualidad por grupo de especies de pino de los ejidos de la región de El Salto.....	46
Tabla 7. Volumen total por anualidad por grupo de especies de encino de los ejidos de la región de El Salto	46
Tabla 8. Conversión del volumen total de los residuos de pino a kWh.....	48
Tabla 9. Conversión del volumen total de los residuos de encino a kWh.....	48
Tabla 10. Reducción de toneladas de tCO ₂ equivalente	50
Tabla 11. Flujo de efectivo	52
Tabla 12. Valor actual neto o valor neto presente	53
Tabla 13. Tasa interna de retorno	54

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Ubicación del área de estudio	16
Figura 2. Representación gráfica de la toma de datos de árboles muestra para las diferentes secciones, ramas y punta	18
Figura 3. Porcentaje del VTA que representa el volumen de ramas (línea verde), el volumen de la punta (línea azul) y el volumen total de residuos (línea roja) por categoría diamétrica por especie	27
Figura 4. Valores observados vs valores predichos de volumen total (m^3) de residuos y la línea de tendencia relación 1 a 1	31
Figura 5. Volumen autorizado de pino m^3 (línea verde) y volumen disponible de residuos m^3 (línea anaranjada) en los ejidos de la región de El Salto	44
Figura 6. Volumen autorizado de encino m^3 (línea café) y volumen disponible de residuos m^3 (línea anaranjada) en los ejidos de la región de El Salto	45

LISTA DE UNIDADES

a	Año
cm	Centímetro
€	Euros
EJ	Exajulio
GWh	Gigavatio-hora
° C	Grados centígrados
ha	Hectárea
Km	Kilómetro
KWh	Kilovatio-hora
m	Metros
m ³	Metro cúbico
Mha	Millón de hectáreas
MI	Millón de litros
Mt	Megatoneladas
MtMS	Megatoneladas de materia seca
MW	Megavatio
PJ	Petajulio
ppm	Partes por millón
t	tonelada

LISTA DE SÍMBOLOS Y ABREVIATURAS

CIFOR	Centro para la Investigación Forestal Internacional
D	Diámetro
DAP	Diámetro a la altura de pecho
dfr	Grados de libertad del error en el modelo reducido
dff	Grados de libertad del error en el modelo completo
EIA	Energy Information Administration
ETS	Econometrics and Time Series Analysis
F*	Valor calculado de la prueba de F
FAO	Food and Agriculture Organization of the United Nations
GEI	Gases de efecto Invernadero
IEA	International Energy Agency
IPCC	Panel Intergubernamental para el cambio climático
LAERFTE	Ley para el aprovechamiento de energías renovables y el financiamiento de la transición energética
MEDEC	México: Estudio sobre la disminución de emisiones de carbón
P	<i>Pinus</i>
Pr	Probabilidad calculada
parm	Parámetros
R ²	Coefficiente de determinación
R _a ²	Eficacia del modelo
RMSE	Root Mean Square Error
RTA	Rollo total árbol
SAS	Statistical Analysis System
sp	Especie
SSE (R)	Suma de cuadrados del error del modelo reducido
SSE (F)	Suma de cuadrados del error del modelo completo
StdE	Error Estándar
TIR	Tasa interna de retorno
t-value	Valor de probabilidad de la distribución t de student
UMAFOR	Unidad de Manejo Forestal
VAN	Valor Actual Neto
VNP	Valor Neto Presente
VTA	Volumen Total Árbol
WBGU	German Advisor Council on Global Change
α	Alfa
$\hat{\epsilon}$	Error estimado
σ	Varianza
θ_i	Estimador del parámetro
\emptyset	Conjunto vacío

RESUMEN

El objetivo principal de este estudio fue generar información relacionada del potencial energético y económico de los residuos forestales, específicamente de los componentes del árbol ramas y puntas, de los bosques de pino y encino de la región de El Salto, Durango, para la producción de energía renovable.

Para estimar la disponibilidad de residuos forestales y evaluar los costos de generación de energía limpia en este estudio, la metodología se divide en tres partes; en la primera se revisaron los programas de manejo forestal maderable de 20 ejidos de la UMAFOR 1008 El Salto, para calcular el volumen total de la distribución de productos (primario, secundario, celulósico y desperdicio) por predio; mientras que en la segunda parte se cubicaron 2,156 árboles provenientes de un muestreo de campo en las áreas de corta de los ejidos considerados en el estudio. Los resultados estimados indican que existe una disponibilidad de residuos forestales promedio de 29,247 ton año⁻¹ en todo el ciclo de corta, con este resultado se calculó una reducción potencial de emisiones de gases de efecto invernadero anual de 15, 793 ton de CO₂e, por el cambio en el tipo de generación de energía eléctrica.

Posteriormente en la tercera parte, el análisis económico, los resultados de los indicadores financieros indican que es viable la instalación de una planta de gasificación de residuos de biomasa forestal para la generación de bioenergía en la región de El Salto, Durango, en un periodo diseñado tentativamente para 10 años.

ABSTRACT

The main objective of this study was to generate information from the energy and economic potential of forest residues, specifically of the components of the tree branches and tips, forests of pine and oak in the region of El Salto, Durango, for the production of renewable energy.

To estimate the availability of forest residues and assess the costs of this study clean energy generation, the methodology is divided into three parts; in the first reviewed the 20 ejidos of the UMAFOR 1008 jump timber forest management programs, to calculate the total volume of distribution of products (primary, secondary, cellulosic and waste) by ejido; While the second part was obtained the volume of 2,156 from trees of a field sampling in areas short of the ejidos considered in the study. The estimated results indicate that there is an availability of 29,247 ton average forest residues year-1 in all the cutting cycle, with this result was calculated a potential reduction in annual greenhouse gas emissions of 15,793 ton de CO₂e, by the change in the type of electrical power generation.

Later in the third part, economic analysis, results from financial indicators indicate that it is feasible to install a plant of waste gasification of forestry biomass for the generation of bioenergy in the region of El Salto, Durango, in a period designed tentatively for 10 years.

1. INTRODUCCIÓN

En el marco de la transición hacia una sociedad más sostenible basada en tecnologías de energía limpia, la biomasa se perfila como una de las más importantes fuentes de energía renovable. Por un lado, debido a los beneficios ambientales, la bioenergía implica una reducción de las emisiones de dióxido de carbono y contribuye a disminuir el impacto ambiental causado por la utilización de combustibles fósiles que son utilizados en el proceso para generar energía eléctrica; por otra parte, la bioenergía constituye un factor clave en el desarrollo económico de las zonas rurales y mejora el acceso de energía (Schmidhube, 2013).

Los principales recursos energéticos que se utilizan (carbón, petróleo y gas natural) son limitados y, por lo tanto, pueden agotarse, además, su utilización provoca un gran impacto ambiental en la biósfera al contaminar el aire, el agua y el suelo (Chinoweth, 2002). Estos impactos han generado un interés creciente por el desarrollo de nuevas tecnologías para la utilización de fuentes de energía renovables alternativas (Flotats *et al.*, 2000).

La problemática energética a nivel mundial ha generado la necesidad de impulsar el desarrollo de fuentes de energía renovables como la dendroenergía, la cual se considera una alternativa sustentable de producción ante la crisis energética y ambiental relacionada con la dependencia de combustibles fósiles, que contribuyen al efecto invernadero y al calentamiento global. El uso energético de la biomasa vegetal permite una eficiencia mayor en la gestión forestal al obtener biocalor, bioelectricidad y biocombustibles. Según Hernández (2004), la oferta mundial de energía primaria estuvo compuesta principalmente de petróleo (34%), carbón mineral (24%), gas (21%), nuclear (7%), biomasa tradicional y desechos (11%), hidroelectricidad (2.3%) y otras fuentes (.05%).

En países industrializados como Finlandia y Suecia, el consumo de leña en el balance energético es alto, al representar el 15% y el 8%, respectivamente. En México, el consumo de biomasa en el sector rural representa el 69% del consumo

energético, seguido de la gasolina (10.43%), el gas butano (9.98%), el diésel (6.33%), la electricidad (2.53%) y el petróleo (1.58%) (Aragón, 2009).

Los avances científicos han permitido el desarrollo de tecnologías más eficientes y limpias para la conservación de biomasa en energía; su transformación permite obtener combustibles sólidos, líquidos y gaseosos mediante, procesos de combustión directa, termoquímica y bioquímica. Los principales productos obtenidos son: carbón, pellets, briquetas, bioetanol y biogás, entre otros. Sin embargo, para su obtención es necesario adaptarse a un sistema de producción sustentable, con la finalidad de obtener ventajas ambientales, sociales e impulsar el desarrollo económico e industrial (Villalón y Carrillo, 2010).

Durante la última década, la utilización de la bioenergía aumentó de 8% de la oferta total mundial de energía primaria a 10% en la actualidad y se espera que aumente aún más entre el 25% y el 33% en 2050 (International Energy Agency, 2013).

Este estudio tiene como objetivo estimar la cantidad de volumen de residuos del aprovechamiento forestal basado en mediciones de biomasa directos para las especies de pino y encino con propósitos bioenergéticos y dictaminar la factibilidad económica de la generación de energía renovable en la región de El Salto, Durango.

2. OBJETIVOS

2.1. General

Analizar la factibilidad del uso de los residuos del aprovechamiento forestal para propósitos bioenergéticos en la región de El Salto, Durango.

2.1.1. Particulares

- I. Determinar la disponibilidad de residuos para la producción de energía eléctrica en la región de El Salto, Durango.
- II. Estimar la cantidad de bioenergía que puede ser generada a partir de los residuos del aprovechamiento forestal.
- III. Estimar los costos de producción de bioenergía a partir de los residuos del aprovechamiento forestal.
- IV. Dictaminar la factibilidad económica de la generación de bioenergía.

3. HIPÓTESIS

La bioenergía producida a partir de residuos de biomasa forestal producto del aprovechamiento forestal en la región de El Salto, Durango, es viable para abastecer el mercado local de la región de estudio.

4. REVISIÓN DE LITERATURA

4.1. Uso de la biomasa

El uso de la biomasa como combustible data desde tiempos en que el ser humano aprendió a manejar el fuego, quizás el uso más antiguo fue en las primeras hogueras en las cuevas donde vivían nuestros antepasados (Antal y Gronli, 2003). Con el paso del tiempo, en Egipto, se perfeccionaron los sistemas de producción de biomasa leñosa y el uso progresivo del carbón vegetal constituyó la base energética de las antiguas civilizaciones (Patiño y Smith, 2008). Posteriormente, se empleó para producir metales y para alimentar las máquinas de vapor. Fueron precisamente estos nuevos usos que progresivamente requerían mayor cantidad de energía en un espacio cada vez más reducido, los que promocionaron el uso del carbón como combustible sustituto a mediados del siglo XVIII. Desde ese momento se empezaron a utilizar otras fuentes energéticas más intensivas y el uso de la biomasa fue bajando hasta mínimos históricos que coincidieron con el uso masivo de los derivados del petróleo, con unos precios bajos de estos productos (Energías Renovables, 2004).

Actualmente, en algunos países la biomasa es la principal fuente de energía y a nivel mundial se considera una forma moderna y limpia de obtener energía (Patiño y Smith, 2008).

4.2. Concepto de biomasa

Etimológicamente, biomasa es un término compuesto por el prefijo “bio” (del griego bios, vida) y “masa” (del latín massa, masa, bulto o volumen), es decir, hace referencia a “masa biológica”. La entrada en el diccionario de la Real Academia de la Lengua Española define biomasa en su primera acepción como “materia total de los seres que viven en un lugar determinado, expresada en peso por unidad de área o volumen”. Otra definición usualmente utilizada cuando se hace referencia a la biomasa como una fuente de energía primaria o se plantea su aprovechamiento energético (ámbito en el que queda circunscrito esta tesis), propone que “es la materia orgánica fijada por la fotosíntesis y la materia derivada

de las transformaciones naturales o artificiales de dichos compuestos orgánicos” (Garrués, 2010).

Es necesario diferenciar previamente los conceptos de “biomasa”, “biomasa forestal” y “residuos forestales”, dado que son términos que se usan en ocasiones indistintamente, pero que poseen significados distintos desde el punto de vista técnico.

Se denomina biomasa a la materia orgánica originada en un proceso biológico, espontáneo o provocado, utilizable como fuente de energía aunque puede tener otros usos industriales, siendo la biomasa forestal aquella que es generada en los montes. La biomasa forestal es susceptible a ser aprovechada de forma industrial, parte de ella se utiliza como materia prima para su transformación (madera, corcho, pasta de celulosa, etc.), otra se utiliza como combustible. Generalmente la extracción de esta biomasa de los montes se denomina aprovechamiento forestal. De la biomasa extraída en el aprovechamiento que llega a la industria una parte se utiliza para obtener bienes manufacturados, la parte sobrante es residuo industrial. A pesar de que estos residuos tienen su origen en el monte, no pueden ser considerados residuos forestales. En sentido estricto, sólo son tales, aquellos que son generados directamente en el medio forestal. Definimos residuos forestales como aquellos materiales que se desprenden en los aprovechamientos madereros y no son extraídos habitualmente por no ser convertibles en subproductos pero que pueden ser utilizados como combustible orgánico. Los residuos generados directamente en aprovechamientos madereros pueden tener su origen en actividades diversas: aclareos, podas, selección de rebrotes, etc. Actualmente la mayor parte de los residuos forestales procede de cortas finales. En estos casos este material está compuesto por ramas, puntas, hojas y acículas. Los tratamientos más comunes de esta biomasa residual son la quema controlada o el amontonamiento del material en el monte. En raras ocasiones se trituran o astillan abandonándose en el bosque para favorecer la rápida incorporación al suelo. El coste adicional que supone el tratamiento de estos residuos, hace que en la mayor parte de los casos

el material quede disperso por la zona de corta. En algunas ocasiones, generalmente cuando se realiza una regeneración artificial, se ejecuta un desbroce o trituración in situ con el fin de facilitar las labores de plantación. El abandono de estos materiales en la superficie del monte supone un alto impacto ambiental. Esto es debido a que el elevado volumen de biomasa sobrante tiene una lenta descomposición, permaneciendo largo tiempo en el lugar. En la época calurosa estos residuos sufren un secado suponiendo posteriormente focos con alto riesgo de incendio. Por otra parte, ejerce un impacto paisajístico visual y sobre la fauna de la zona, que ve limitada su movilidad. Además, puede suponer una fuente de parásitos y plagas (Hakkila *et al.*, 1997).

4.3. Fuentes de biomasa forestal

De acuerdo a Madrid (2012) la biomasa como fuente para la producción de energía renovable puede clasificarse en:

- Biomasa natural. Se produce de forma espontánea en la naturaleza, sin intervención humana. Por ejemplo, las podas naturales de los bosques.
- Biomasa residual seca. Procede de recursos generados en las actividades agrícolas y forestales. También se produce este tipo de biomasa en procesos de la industria agroalimentaria y de la industria de transformación de la madera. Dentro de este tipo de biomasa, se puede diferenciar la de origen forestal y origen agrícola.
- Biomasa residual húmeda. Procede de vertidos biodegradables formados por agua residuales urbanas e industrias y también de los residuos ganaderos.
- Cultivos energéticos tanto forestales como agrícolas. Son aquellos cultivos realizados tanto en terrenos agrícolas como forestales y que están dedicados a la producción de biomasa con fines no alimentarios.

4.4. Proceso de transformación de biomasa para fines energéticos

Según García (2012) la gran variedad de materiales diferentes incluidos dentro del concepto biomasa permite a su vez plantear una gran cantidad de posibles procesos de transformación de esta biomasa en energía.

Aplicando los diferentes procesos de conversión, la biomasa puede transformarse en diferentes formas de energía:

4.4.1. Calor y vapor

Es posible generar calor y vapor mediante la combustión de biomasa o biogás. El calor puede ser el producto principal para aplicaciones en calefacción y cocción, o puede ser un subproducto de la generación de electricidad en plantas que cogeneran electricidad y vapor.

4.4.2. Combustibles gaseosos

El biogás producido en procesos de digestión anaeróbica o gasificación puede ser usado en motores de combustión interna para generación eléctrica, para calefacción y acondicionamiento en el sector doméstico, comercial e institucional y en vehículos modificados.

4.4.3. Biocombustibles

La producción de biocombustibles como el etanol y biodiesel tiene potencial para reemplazar cantidades significativas de combustibles fósiles en muchas aplicaciones de transporte. El uso extensivo de etanol en Brasil ha demostrado durante más de 20 años que los biocombustibles son técnicamente factibles a gran escala. En los Estados Unidos y Europa su producción está incrementándose y se están comercializando mezclados con derivados del petróleo. Por ejemplo, la mezcla denominada E20, constituye el 20% de etanol y el 80% de petróleo, resulta aplicable en la mayoría de los motores de ignición. Actualmente este tipo de combustibles recibe algún tipo

de subvención o ayuda estatal, pero, en el futuro, con el incremento de los cultivos energéticos y las economías de escala, la reducción de costos puede hacer competitiva su producción.

4.4.4. Electricidad

La electricidad generada a partir de los recursos biomásicos puede ser comercializada como “energía verde”, pues no contribuye al efecto invernadero por estar libre de emisiones de dióxido de carbono (CO₂). Este tipo de energías puede ofrecer nuevas opciones al mercado, ya que su estructura de costos permitirá a los usuarios soportar mayores niveles de inversión en tecnologías eficientes, lo cual incrementará la industria energética.

4.4.5. Co-generación (calor y electricidad)

La co-generación se refiere a la producción simultánea de vapor y electricidad, que puede aplicarse a muchos procesos industriales que requieren las dos formas de energía. En América Central, por ejemplo, este proceso es muy común en la industria azucarera, donde es posible aprovechar los desechos de proceso, principalmente el bagazo. Por la alta fiabilidad de bagazo disponible, tradicionalmente, la co-generación se realiza de una forma bastante eficiente. Sin embargo, en los últimos años ha existido la tendencia a mejorar el proceso para generar más electricidad y vender el excedente a la red eléctrica.

Los procesos que se pueden seguir para realizar esta transformación pueden dividirse en físicos, físico-químicos, termoquímicos, y biológicos.

4.5. Bondades de la bioenergía

Si se aprovecha de manera sustentable, la bioenergía presenta numerosas ventajas sociales, económicas y ambientales:

Permite crear sinergias positivas por la interacción entre el sector agrícola-forestal (donde se produce la biomasa), el sector industrial que la transforma y los sectores que la utilizan (energético, transportes, residencial, etc.) Estas sinergias crean empleo local y agregan valor a los productos, al mismo tiempo que reducen la dependencia de recursos fósiles.

Debido a que la producción de biomasa es descentralizada, se pueden producir bioenergéticos en pequeñas y medianas empresas y facilitar así el desarrollo local en zonas rurales. Se estima que la biomasa crea 135 puestos de trabajo por cada 10,000 usuarios, frente a los nueve que se crean utilizando petróleo o gas natural (Drigo y Trossero, 2005).

4.6. Contexto internacional de bioenergía

4.6.1. Consumo mundial de bioenergía

En la actualidad los biocombustibles sólidos tienen muchos usos finales: la generación de electricidad por co-combustión directa y gasificación en centrales carboeléctricas; cogeneración de electricidad, vapor y agua caliente en plantas industriales y plantas de calefacción distritales; calefacción y refrigeración en edificios y viviendas uni o multifamiliares.

Industrias menores como ladrilleras, caleras, panaderías, etc. usan biomasa sólida procesada para hornos, calcinadoras y otros equipos. Siderúrgicas y plantas de silicio los utilizan como combustibles/reductores, con lo que sustituyen al coque de carbón. Hay una decena de plantas piloto y demostrativas que gasifican pellets y otras biomásas sólidas para producir gas de síntesis y transformarlo en productos químicos y biocombustibles sintéticos. Se espera que la biomasa sólida procesada –particularmente la lignocelulósica– sea en el futuro próximo la materia prima principal para los biocombustibles de segunda generación.

El uso de biomasa sólida para producir electricidad creció en 13 TWh/a desde el año 2000 hasta el 2008. Existe un total de 62 países productores de electricidad a partir de biomasa, siendo Estados Unidos el de mayor participación (26%),

seguido de Alemania (15%), Brasil y Japón (ambos con 7%) (Evans *et al.*, 2010). Se espera que la participación de la biomasa para la generación eléctrica mundial aumente en un 175% de 2007 a 2030 (FAO, 2010).

4.6.2. Escenarios mundiales de la bioenergía

Un escenario tendencial realizado en el 2010 por la Administración de Información Energética de Estados Unidos (EIA, por sus siglas en inglés) estima que el consumo mundial de energía se incrementará en un 47% al año 2035, y de no existir cambios sustanciales de participación de las energías renovables, el consumo de combustibles fósiles representaría el 71% (EIA, 2010). En el sector transporte, un 96% de la oferta provendría del petróleo (IEA, 2009). Este escenario considera que las emisiones de GEI se incrementarían en un 41% para el año 2035, con los consecuentes riesgos asociados al calentamiento global y el cambio climático.

Por el contrario, los escenarios dirigidos a la mitigación de emisiones muestran que la bioenergía puede jugar un papel fundamental en el suministro de energía en el mediano y largo plazo. El Consejo Consultivo Alemán para el Cambio Global (WBGU, por sus siglas en alemán) estimó que el potencial de participación de la bioenergía en el sistema energético mundial podría estar entre los 80 y 170 EJ, lo que equivale al 17%–36% del consumo de energía primaria en el mundo en 2008 (Schubert *et al.*, 2009). Por su parte, el IPCC señala que el potencial de la energía primaria que podría obtenerse de la biomasa va de 50 EJ/a a 500 EJ/a, del 10% a casi el 100% del consumo mundial de energía de 2008 (550 EJ).

En un análisis muy detallado sobre las perspectivas futuras de penetración de las fuentes renovables de energía, se estimó que para evitar concentraciones mayores a 440 ppm de CO_2 atmosférico (es decir para evitar un calentamiento mayor a 20°C) en el año 2050, la biomasa debería abastecer el 60% del consumo total de energías renovables al brindar 150 EJ/a (IPCC, 2011, por sus siglas en inglés).

4.7. Contexto de bioenergía en México

4.7.1. Situación en México

El reporte del Centro para la Investigación Forestal Internacional (CIFOR), indica que en México existe un potencial de producción de biomasa forestal sostenible para energía de 1,923 PJ/a. De esta cantidad, entre 1,080 y 1,800 PJ/a –de 60 a 100 MtMS/a–, pueden provenir de residuos de la cosecha forestal, aclareos y cortas de sanidad en bosques y selvas nativas. Otros 180 PJ/a –10 MtMS/a– están disponibles como residuos de las industrias forestales y sistemas agroforestales tradicionales de roza-tumba-quema (“huamiles” o “acahuales”). Chips y pellets de este origen tienen muy alta relación entre energía renovable obtenida por unidad de energía fósil consumida (CIFOR, 2009). El potencial de los residuos agrícolas también es alto, aun si un 50% de los rastrojos queda en el sitio para reciclar la materia orgánica y los nutrientes en el suelo. Algunas limitaciones a su uso son la disponibilidad estacional y dispersa, el alto contenido de cenizas y la competencia por otros usos (forrajes).

4.7.2. Escenarios de bioenergía en México

Existen por lo menos 2 estudios recientes que presentan escenarios en los que se examina el rol futuro de la bioenergía en detalle en México. El primero de ellos (Islas *et al.*, 2007) establece que la bioenergía podría representar el 16% del total de la energía consumida en el país en 2030, y podría mitigar el 18% de las emisiones de CO₂ en ese año. Los detalles del estudio se presentan en Masera *et al.* (2006).

El segundo estudio “México: estudio sobre la disminución de emisiones de carbono” (MEDEC), coordinado por el Banco Mundial, evaluó el potencial para reducir emisiones de GEI en México en el período 2008-2030 (Johnson *et al.*, 2009). En éste se contemplaron intervenciones en cinco sectores clave: electricidad, petróleo y gas, uso final estacionario de energía, transporte, y agrícola/forestal. Se utilizó una metodología común para permitir la comparación entre todas las intervenciones.

Los criterios para la selección de las intervenciones viables fueron: 1) potencial importante de mitigación de GEI; 2) costos económicos y financieros bajos; 3) factibilidad tecnológica en el corto y mediano plazo (mediante el uso de tecnologías maduras).

El estudio estimó que las emisiones del escenario base alcanzarán 1,137 MtCO_{2e} en 2030 partiendo de 659 MtCO_{2e} en 2008. En contraste, las 40 intervenciones viables que componen el escenario alternativo reducirían las emisiones en 477 MtCO_{2e} para 2030 con respecto a la línea base. En otras palabras, según este escenario, México podría estabilizar sus emisiones de GEI en el año 2030 con estas opciones, pero las aumentaría en un 72% si no lo hace.

Las intervenciones en bioenergía son fundamentales para lograr la mitigación esperada por el escenario MEDEC y contribuyen con el 9.6% del total de la mitigación en 2030. Las opciones consideradas incluyen hacer más eficiente y sostenible la producción y uso de leña y carbón vegetal, generar electricidad en gran escala y producir combustibles líquidos para el transporte, entre otras. Se basan en un estudio detallado del potencial de tierras cultivables y recursos forestales, que excluyó a las tierras hoy dedicadas al cultivo de alimentos, las áreas naturales protegidas y las áreas que necesitan riego. Se les resume así:

- Estufas eficientes de leña: supone el reemplazo de fogones tradicionales de leña por estufas eficientes. La penetración total alcanza alrededor del 70% de los hogares rurales, totalizando 3.2 millones de estufas en 2030.
- Hornos eficientes para la producción de carbón vegetal: propone el remplazo de hornos tradicionales de tierra para la producción de carbón vegetal por hornos de ladrillo más eficientes. La hipótesis de penetración supone un total de casi 9,000 hornos eficientes en el periodo de estudio. También considera satisfacer el 75% de la demanda de coque industrial.
- Generación eléctrica con leña: implica la construcción de 200 plantas de generación eléctrica, cada una con potencia de 25 MW. El combustible sería leña proveniente de bosques manejados de manera sustentable.

- Co-combustión con leña para generación de electricidad: propone sustituir 20% del carbón mineral por leña proveniente de manejo forestal sustentable en la central carboeléctrica de Petacalco.
- Cogeneración con bagazo: supone aumentar la cogeneración de electricidad y vapor de proceso en ingenios azucareros, con capacidad instalada de 2 MW al 2020.
- Biodiesel de palma aceitera: supone la construcción y operación de 21 plantas de biodiesel de aceite de palma, con capacidad de 39 MI/a por planta. Para esto se requiere plantar 9,000 ha/a con un total acumulado de 189,000 ha al 2030.
- Etanol de sorgo: establece la construcción y operación de 27 plantas con capacidad de 165 MI/a por planta. Cada una consume la producción de 115,000 ha de sorgo granífero, con un total acumulado de 3.1 Mha al 2030.
- Etanol de caña de azúcar: incluye la construcción y operación de 116 plantas de etanol de caña de azúcar con capacidad de 85 MI/a cada una. Cada planta requiere 15,000 ha de cultivo, totalizando 1.74 Mha al 2030.

5. ESTIMACIÓN DE LOS RESIDUOS FORESTALES MEDIANTE EL USO DE RELACIONES ALOMÉTRICAS PARA LAS ESPECIES DE PINO Y ENCINO

5.1. RESUMEN

La estimación del volumen de residuos forestales es una herramienta importante en el manejo forestal, por lo cual el objetivo de este capítulo fue evaluar el potencial de los residuos de la cosecha forestal con propósitos bioenergéticos en los bosques de la región de El Salto, Durango. La metodología de este trabajo se divide en dos partes; en la primera se revisaron programas de manejo forestal maderable de la UMAFOR 1008 El Salto, para calcular el volumen total de la distribución de productos (primario, secundario, celulósico y desperdicio) por predio; mientras que en la segunda parte se cubicaron 2,156 árboles provenientes de un muestreo de campo en las áreas de corta de los ejidos considerados en el estudio. Una vez conocido el volumen de las distintas

secciones del árbol por especie, los ajustes estadísticos se realizaron desde tres enfoques: 1) ajustar una ecuación para cada especie por separado, 2) ajustes globales considerando variables ficticias combinando todas las especies (modelo completo) y, 3) ajustes globales combinando todas las especies (modelo reducido). La prueba estadística para verificar la ganancia en cuestión de errores de trabajar con uno u otro modelo fue la prueba de F. El porcentaje de residuos forestales por especie fue mayor en madera de encino que de pino. Los cálculos indicaron que la cantidad total de residuos forestales es mayor para la especie de pino por ciclo de corta. Este análisis permitió conocer la disponibilidad de biomasa residual con propósitos bioenergéticos. Posteriormente se calculó la reducción potencial de emisiones de gases de efecto invernadero por el cambio en el tipo de generación de energía eléctrica.

5.2. ABSTRACT

The estimation of the volume of forest residues is an important tool in forest management, therefore the objective of this chapter was to evaluate the potential of the crop residues forestry purposes bioenergy in the forests of the region of El Salto, Durango. The methodology of this study is divided into two parts; the first reviewed the 1008 UMAFOR hop timber forest management programs, to calculate the total volume of distribution of products (primary, secondary, cellulosic and waste) by ejido; While the second part was obtained the volume of 2,156 from trees in a field sampling in areas short of the ejidos considered in the study. Once known the various sections of the tree volume by species, the statistical adjustments were made from three approaches: 1) set an equation for each species separately, 2) global settings given fictitious variables combining all species (full model) and, 3) global settings by combining all the species (small model). The statistical test to check the gain in question of errors of work with one or another model was the F test. The percentage of forest residues per species was greater in wood of Oak to pine. The calculations indicated that the total amount of forest residues is higher for the species of pine by cutting cycle. This analysis allowed the availability of residual biomass for bioenergy purposes. The

potential reduction of emissions of greenhouse gases was subsequently calculated by the change in the type of electric power generation.

5.3. INTRODUCCIÓN

La utilización de biomasa ha incrementado sustancialmente en los últimos años en diferentes parte del mundo principalmente en la unión Europea y Norte América; con la finalidad de cumplir con los objetivos fijados en el Plan Nacional de Energías Renovables, los bosques, que son una fuente importante de bioenergía, podrían contribuir a aumentar la cuota de energía renovable (Karjalainen *et al.*, 2004). Se espera que la participación de la biomasa para la generación eléctrica mundial aumente en un 175% de 2007 a 2030 FAO (2010). En los bosques de la región forestal de El Salto, Durango, México, una parte significativa de la biomasa forestal, como las ramas y puntas de los árboles, por lo general no se recupera durante el proceso de cosecha, ya que no se puede convertir fácilmente en productos de madera utilizables como la madera aserrada. En muchos casos, los restos de la tala son reducidos y esparcidos en el bosque para reducir el riesgo de incendio o simplemente se deja descomponer en el suelo. Sin embargo, convirtiendo en trozos pequeños los residuos, es posible su utilización como combustible, y cuando se añaden los residuos de los aserraderos el volumen de combustible disponible puede ser suficiente para crear una valiosa fuente de materia prima para su transformación en energía renovable (Vargas-Larreeta *et al.*, 2010).

En México existe poca información conexas a la cuantificación y disponibilidad de residuos de biomasa derivados de la cosecha forestal, por lo que el objetivo del presente estudio fue estimar la cantidad de residuos forestales en base a un muestreo destructivo y el uso de relaciones alométricas para las especies de pino y encino en la región de El Salto, Durango.

5.4. MATERIALES Y MÉTODOS

5.4.1. Área de estudio

El área de investigación se ubica al suroeste de la ciudad de Durango, a una distancia aproximada de 120 km, en el municipio de Pueblo Nuevo, localizado dentro de la cadena de montañas de la Sierra Madre Occidental, la cual cuenta con algunas de las más ricas biodiversidades de América del Norte, y contiene aproximadamente dos terceras partes de la madera en pie en México. 23 especies diferentes de pino y cerca de 200 especies de encino residen dentro de la eco-región de la Sierra Madre Occidental (Kennedy, 2008). Su fisiografía está constituida por mesetas y cañadas con un sistema de relieve con laderas definidas u onduladas, en las cuales se definen tres tipos: accidentada, ondulada y plana (Figura 1).

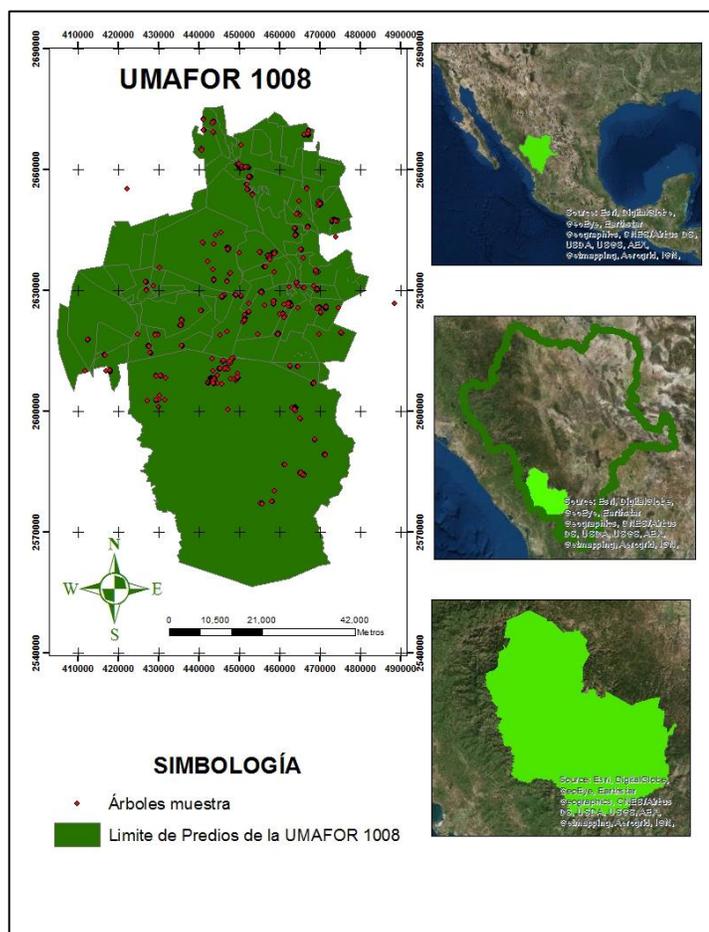


Figura 1. Ubicación del área de estudio

5.4.2. Base de datos

Para calcular el volumen del fuste y de las ramas se derribaron, seccionaron y cubicaron árboles por categoría diamétrica y por especie, en rodales de la región de El Salto, Pueblo Nuevo, Durango. Los árboles fueron seleccionados a través de un muestreo destructivo dirigido para representar todas las calidades de estación de la región así como también la distribución de los árboles en términos de clases de diámetro y altura (derribo y troceo de los mismos), aunque en algunos casos se encontraron dificultades para completar las clases diamétricas más altas. En total 2,156 árboles fueron muestreados y medidos en este estudio; de los árboles elegidos se procedió a medir, entre otras variables, el diámetro normal con corteza en pie (D, en cm), la altura total (H, en m), longitud de la copa (C, en m), diámetro con corteza de cada sección (d, en cm), longitud para cada sección a la que fue seccionada (l, en m), diámetro con corteza para todas las ramas que tuvieron más de 5 cm de diámetro en la base y las puntas cuyo diámetro con corteza osciló entre 5 y 10 cm. Una vez seccionados se desramaron y se procedió a la separación en sus diferentes fracciones de biomasa (fuste, puntas y ramas de diámetro mayor de 5 cm en la base), aprovechando las áreas de corta de los ejidos donde se realizó el estudio.

Tabla 1. Distribución de la muestra por especie

Código	Especie	No. de árboles
1	<i>Pinus cooperi</i>	167
2	<i>Pinus durangensis</i>	194
3	<i>Pinus engelmannii</i>	166
4	<i>Pinus leiophylla</i>	174
5	<i>Pinus herrerae</i>	148
6	<i>Pinus teocote</i>	177
7	<i>Pinus lumholtzii</i>	107
8	<i>Pinus ayacahuite</i>	106
9	<i>Pinus oocarpa</i>	160
10	<i>Pinus douglasiana</i>	217
11	<i>Pinus michoacana</i>	141
13	<i>Pinus maximinoi</i>	87
170	<i>Quercus sideroxyla.</i>	164
172	<i>Quercus durifolia</i>	148
TOTAL		2,156

5.4.3. Cuantificación del volumen de residuos

Para calcular el volumen que representan las ramas respecto al volumen total del árbol, se midieron todas las ramas mayores de cinco cm en la base, ya que es el diámetro mínimo que se acepta para trabajos de generación de bioenergía; éstas fueron seleccionadas y cubicadas de la misma manera que el fuste (formula de smalian).

El volumen de las puntas fue calculado con la fórmula del cono, considerando un diámetro en la base que osciló entre 5 y 10 cm.

Al igual que las ramas menores de cinco cm de diámetro en la base y las acículas, las raíces no se incluyeron en estas evaluaciones, ya que fueron consideradas como criterio de restricción ecológica para la incorporación de nutrientes al suelo.

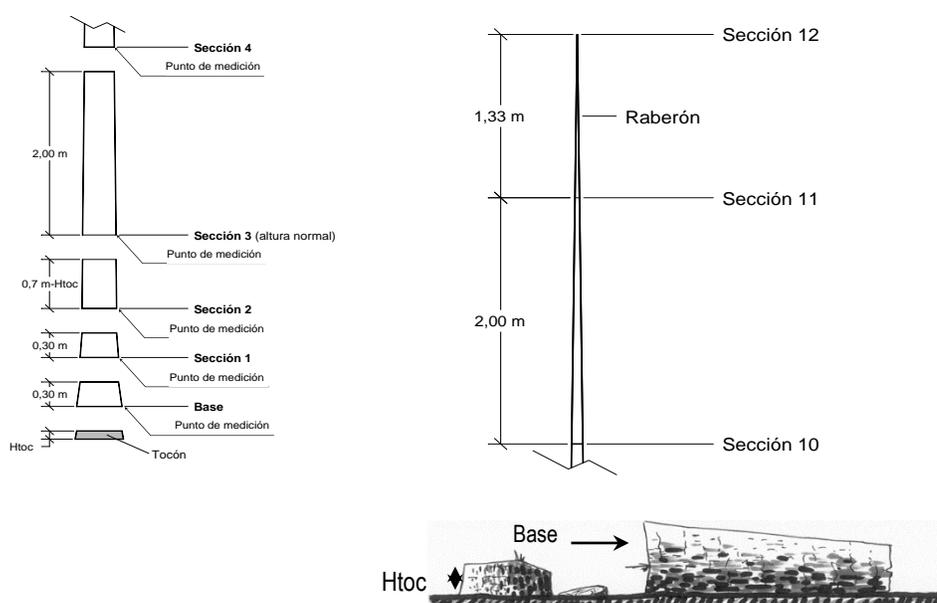


Figura 2. Representación gráfica de la toma de datos de árboles muestra para las diferentes secciones, ramas y punta

Una vez conocido el volumen de ramas (V_{ramas}) y el volumen de la punta (V_{punta}), se restó del volumen del fuste; finalmente se calculó el factor que estima el volumen de las ramas más la punta (V_{rp}) respecto al volumen total (V_{total}) mediante la relación:

$$V_{rp} = \left(\frac{V_{ramas} + V_{punta}}{V_{total}} \right) \quad [1]$$

5.4.4. Modelos utilizados

El volumen total disponible de residuos a nivel de árbol individual (ramas y puntas) fue modelado utilizando la Ecuación 2, que relaciona el volumen de residuos con las variables diámetro a la altura de pecho y la longitud de copa del árbol. Esta ecuación es de orden no lineal, por lo que se linealiza tomando logaritmos en ambos términos de la ecuación, resultando una ecuación de la forma [3]:

$$vr = a_0 * d^{a_1} * c^{a_2} \quad [2]$$

$$\ln vr = \ln a_0 + a_1 * \ln d + a_2 * \ln c \quad [3]$$

Donde:

vr = es el volumen de residuos.

d = es el diámetro normal.

c = es la longitud de copa del árbol.

a_i = parámetros del modelo

Ln = logaritmo neperiano.

5.4.5. Ajuste con variables dummy y comparación por pares entre las especies

En este trabajo se utilizó el método de estimación de parámetros con variables ficticias o 'dummy' (dummy approach) propuesto por Cieszewski *et al.* (2000). Las variables indicadoras usadas en el modelo completo fueron consideradas como efectos aditivos a la especie que presentó el mayor número de observaciones en

cada comparación. El planteamiento de los parámetros globales del modelo fue expresado de manera general como:

$$I_j = \begin{cases} 1 & \text{si } sp = j \\ 0 & \text{de otra manera} \end{cases}$$

donde I_j representa la variable indicadora considerada como efectos aditivos a la especie que presentó el mayor número de observaciones en cada comparación (sp); $j = 1$ *Pinus cooperii*, $j = 2$ *P. durangensis*, $j = 3$ *P. engelmannii*, $j = 4$ *P. leiophylla*, $j = 5$ *P. herrerae*, $j = 6$ *P. teocote*, $j = 7$ *P. lumholtzii*, $j = 8$ *P. ayacahuite*, $j = 9$ *P. ocarpa*, $j = 10$ *P. douglasiana*, $j = 11$ *P. michoacana*, $j = 13$ *P. maximinoi*, $j = 170$ *Quercus slderoxyla* y $j = 172$ *Q. durifolia*. Resultando de la asociación de los datos de las especies de encino (170 y 172, *Quercus slderoxyla* y *Q. durifolia*, respectivamente) la especie 175 (*Quercus spp.*).

En este sentido en la Ecuación 2 los parámetros globales fueron expandidos en función de las especies en comparación por pares y se agregó una variable dummy para cada especie, donde I_n es una variable *dummy* igual a 1 para el árbol i y 0 en caso contrario.

$$vr = (a_0 + a_1 * I_1 \dots I_n) * d^{(b_0 + b_1 * I_1 \dots I_n)} * c^{(C_0 + C_1 * I_1 \dots I_n)} \quad [4]$$

El modelo completo con variables indicadoras sólo considera los parámetros significativos ($p \leq 0.05$) en el proceso de modelado.

Partiendo de la Hipótesis de que para los dos modelos, modelo reducido y modelo completo, no existe ganancia en utilizar un modelo u otro; se ajustó cada especie por separado y se realizó la comparación por pares de todas las especies para analizar dicha hipótesis. Los estimadores de los parámetros del modelo original fueron expandidos para todas las especies combinadas; se utilizó la suma de cuadrados del modelo completo y la compara con la suma de cuadrados del modelo reducido.

Para ajustar el modelo reducido se ajustó la Ecuación 2, parámetros únicos, pero incluyendo los datos de las especies en comparación como si fuera una sola.

La prueba estadística que se utilizó para verificar la ganancia en cuestión de errores de trabajar con uno u otro modelo fue la prueba de F generalizada.

$$F^* = \frac{[SSE(R)-SSE(F)] / [df_R - df_F]}{[SSE(F)] / [df_F]} \quad [5]$$

donde F^* sigue una distribución-F de Snedecor; SSE (R) es la suma de cuadrados del error del modelo reducido con el mismo conjunto de parámetros para todas las especies; SSE (F) es la suma de cuadrados del error de un modelo completo con un conjunto diferente de parámetros para cada especie basados en el uso de variables dummy; DFR y DFF son los grados de libertad del error en el modelo reducido y en el modelo completo, respectivamente.

El valor de la prueba de F^* obtenido con la Ecuación 5 se comparó con el valor tabulado de F con $\alpha = 0.05$; si F^* es mayor que el valor tabulado de F se rechaza la hipótesis, lo cual implica que el modelo reducido es inadecuado. En este caso los parámetros del modelo de regresión difieren entre especies. En caso contrario, estadísticamente se aceptaría que se use el mismo modelo para todas las especies.

Rechazar la hipótesis con esta prueba de F no necesariamente implica que los parámetros del modelo de regresión difieran para todas las especies; es posible que algunas de ellas sí se ajusten a un mismo modelo. Para examinar esta posibilidad, se estimaron los valores de los parámetros de regresión de cada especie para buscar ciertas similitudes y se graficaron los datos de DAP y biomasa obtenidos para todas las especies para observar su tendencia en cuanto a la relación de estas dos variables, repitiendo el proceso de comparación de parámetros en los modelos con diferentes pares de especies.

5.4.6. Parámetros estadísticos utilizados para medir el ajuste

La bondad de ajuste de los modelos se midió a través del análisis de los residuales y con la obtención de los estadísticos como el coeficiente de determinación

ajustado (R_a^2), la raíz del cuadrado medio del error (RMSE), valor de t (t-value) y el error estándar (StdE).

Coeficiente de determinación ajustado:

$$R_a^2 = 1 - \left[\frac{n-1 \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{n-1 \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2} \right] \quad [6]$$

Raíz del cuadrado medio del error

$$RMSE = \left[\frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{n - p} \right]^{0.5} \quad [7]$$

donde y_i , \hat{y} e \bar{y} son los valores observados, predichos y promedio de la variable dependiente, n es el número de observaciones, p es el número de parámetros del modelo.

5.5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

5.5.1. Porcentaje de residuos forestales por especie

En la tabla 2 y la Figura 3 se presentan los porcentajes que representan el volumen de la punta y el de ramas en relación al volumen total del árbol. Estos valores permiten estimar de manera directa y sencilla el volumen disponible de residuos por árbol en una determinada categoría diamétrica, simplemente multiplicando el volumen total del árbol por el porcentaje de residuos de la especie respectiva.

Tabla 2. Porcentaje de residuos por categoría diamétrica por especie

sp	Cd (cm)	Vol_punta (%)	Std. Dev	Vol_ramas (%)	Std. Dev	Vol_residuos (%)	Std. Dev
1	20	2.66	0.0025	0.74	0.0097	3.40	0.0071
	25	1.93	0.0026	0.97	0.012	2.90	0.0115
	30	1.53	0.0017	3.16	0.0276	4.69	0.0293
	35	1.48	0.0023	2.46	0.0332	3.94	0.0309
	40	1.59	0.0023	3.80	0.0492	5.39	0.0549
	45	1.43	0.0013	3.77	0.0515	5.20	0.0488

Factibilidad del uso de los residuos del aprovechamiento forestal para propósitos bioenergéticos en la región de El Salto, Durango

sp	Cd (cm)	Vol_punta (%)	Std. Dev	Vol_ramas (%)	Std. Dev	Vol_residuos (%)	Std. Dev
	50	1.48	0.0017	4.52	0.0913	6.00	0.0966
	55	1.11	0.0024	4.53	0.0679	5.64	0.0785
	60	1.51	0.00008	6.58	0.0524	8.09	0.046
2	15	14.51	0.0031	0.38	0.0021	14.90	0.0031
	20	3.44	0.0021	0.99	0.0085	4.43	0.0089
	25	1.47	0.0027	1.98	0.0209	3.45	0.0209
	30	2.07	0.0031	1.74	0.0221	3.81	0.0268
	35	1.51	0.0032	2.15	0.0221	3.65	0.0257
	40	2.00	0.0013	1.93	0.0318	3.94	0.0375
	45	0.61	0.0017	2.80	0.0399	3.41	0.0386
	50	0.50	0.0019	3.74	0.0562	4.25	0.0526
	55	1.27	0.0019	3.78	0.0469	5.06	0.0452
	60	0.95	0.0013	4.02	0.0426	4.97	0.0543
3	10	10.72	0.0025	0.19	0.0003	10.91	0.0026
	15	2.44	0.0022	0.52	0.0120	2.96	0.0050
	20	0.93	0.0016	2.49	0.0115	3.42	0.0129
	25	0.36	0.0017	2.84	0.0090	3.2	0.0110
	30	0.29	0.0016	4.38	0.0193	4.67	0.0228
	35	0.20	0.0014	4.88	0.0238	5.08	0.0255
	40	0.11	0.0014	5.72	0.0341	5.83	0.0375
	45	0.07	0.0014	6.00	0.0473	6.07	0.0526
	50	0.03	0.0021	5.88	0.0430	5.91	0.0455
4	15	3.59	0.0030	1.97	0.0016	5.11	0.0032
	20	0.53	0.0020	2.61	0.0084	3.14	0.0090
	25	0.43	0.0022	2.91	0.0147	3.33	0.0149
	30	0.30	0.0017	4.32	0.0191	4.62	0.0247
	35	0.11	0.0016	4.90	0.0233	5.01	0.0251
	40	0.20	0.0017	5.54	0.0417	3.75	0.0434
	45	0.12	0.0023	4.97	0.0398	5.09	0.0446
	50	0.10	0.0019	5.35	0.0301	5.46	0.0338
5	20	1.02	0.0030	1.73	0.0140	2.76	0.0095
	25	0.42	0.0017	1.89	0.0075	2.31	0.0095
	30	0.32	0.0027	2.68	0.0065	3.0	0.0105
	35	0.13	0.0018	4.04	0.0215	4.17	0.0262
	40	0.08	0.0010	4.54	0.0252	4.62	0.0281
	45	0.12	0.0018	5.89	0.0568	6.01	0.0652
	50	0.04	0.0019	4.76	0.0664	4.81	0.0724
	55	0.07	0.0014	5.79	0.0412	5.85	0.0359
6	20	1.00	0.0029	1.94	0.0042	2.93	0.0054
	25	0.43	0.0014	3.89	0.0132	4.79	0.0153
	30	0.22	0.0020	4.57	0.0192	4.96	0.0212
	35	0.11	0.0013	4.85	0.0254	4.93	0.0287

Factibilidad del uso de los residuos del aprovechamiento forestal para propósitos bioenergéticos en la región de El Salto, Durango

sp	Cd (cm)	Vol_punta (%)	Std. Dev	Vol_ramas (%)	Std. Dev	Vol_residuos (%)	Std. Dev
	40	0.05	0.0013	4.88	0.0292	6.31	0.0336
	45	0.07	0.0012	6.24	0.0344	5.67	0.0377
	60	0.02	0.0014	4.40	0.0172	4.43	0.0118
7	15	1.79	0.0029	2.89	0.0052	4.67	0.0079
	20	0.80	0.0020	5.28	0.0094	6.09	0.0096
	25	0.47	0.0030	8.66	0.0263	9.13	0.0266
	30	0.35	0.0019	8.57	0.0257	8.92	0.0252
	35	0.21	0.0019	10.73	0.0444	10.95	0.0449
	40	0.28	0.0017	9.84	0.0386	10.12	0.0421
	45	0.16	0.0034	10.87	0.0608	11.04	0.0687
8	10	5.47	0.0033	3.11	0.0665	8.58	0.0266
	15	3.59	0.0025	0.89	0.0184	4.47	0.0130
	20	3.07	0.0026	0.44	0.0037	3.51	0.0065
	25	1.85	0.0012	1.20	0.0083	3.06	0.0104
	30	1.85	0.0021	2.55	0.0184	4.39	0.0292
	35	1.40	0.0021	2.84	0.0294	4.25	0.0393
	40	1.54	0.0020	2.92	0.0198	4.46	0.0220
	45	1.38	0.0014	3.19	0.0111	4.56	0.0092
9	10	5.27	0.0033	2.89	0.0560	8.17	0.0283
	15	5.09	0.0042	1.28	0.0118	6.37	0.0097
	20	2.40	0.0028	1.50	0.0046	3.91	0.0055
	25	1.72	0.0022	3.35	0.0115	5.07	0.0138
	30	1.54	0.0024	6.21	0.0418	7.75	0.0496
	35	1.52	0.0036	7.08	0.0463	8.60	0.0530
	40	1.23	0.0024	6.82	0.0732	8.04	0.0792
	45	1.47	0.0017	6.39	0.0340	7.86	0.0471
10	15	15.07	0.0032	1.84	0.0044	16.91	0.0039
	20	3.69	0.0027	1.44	0.0056	5.13	0.0047
	25	1.47	0.0020	1.89	0.0110	3.36	0.0127
	30	0.62	0.0019	3.25	0.0165	3.86	0.0189
	35	0.30	0.0020	4.51	0.0344	4.81	0.0339
	40	0.16	0.0019	7.42	0.0311	7.58	0.0310
11	20	2.43	0.0022	2.90	0.0056	3.14	0.0050
	25	1.78	0.0020	4.66	0.0163	4.67	0.0191
	30	1.39	0.0022	4.69	0.0172	6.05	0.0183
	35	1.16	0.0013	6.19	0.0286	5.85	0.0318
	40	1.16	0.0019	5.95	0.0291	7.35	0.0304
	45	1.22	0.0016	6.19	0.0446	7.17	0.0446
13	20	2.79	0.0031	1.31	0.0050	4.09	0.0071
	25	1.80	0.0020	1.55	0.0110	3.35	0.0129
	30	1.37	0.0015	3.59	0.0169	4.96	0.0214

Factibilidad del uso de los residuos del aprovechamiento forestal para propósitos bioenergéticos en la región de El Salto, Durango

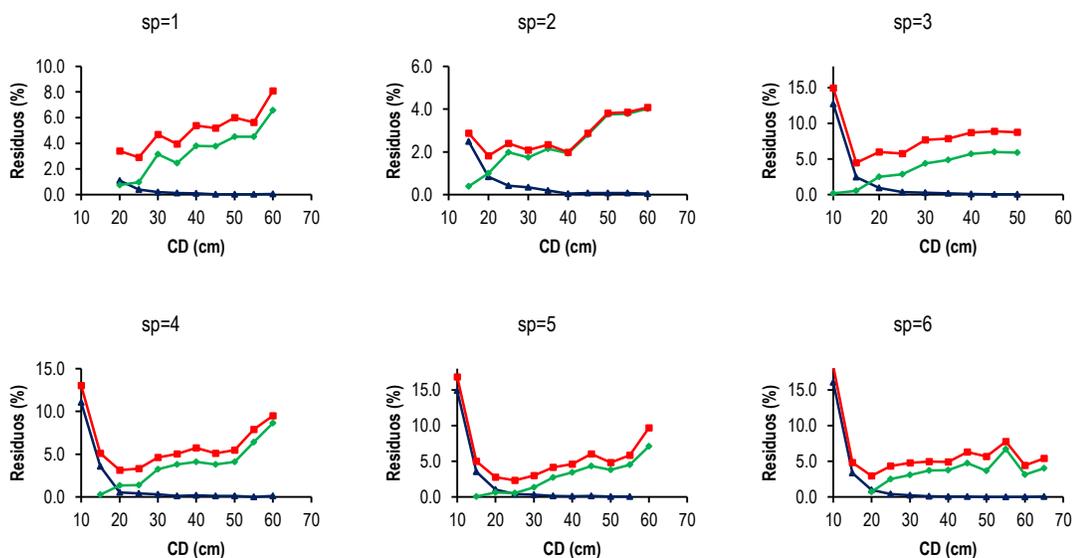
sp	Cd (cm)	Vol_punta (%)	Std. Dev	Vol_ramas (%)	Std. Dev	Vol_residuos (%)	Std. Dev
	35	1.16	0.0025	5.01	0.0216	6.17	0.0272
	40	1.47	0.0015	5.48	0.0002	6.95	0.0005
175	10	7.94	0.0029	1.49	0.0013	9.43	0.0028
	15	3.42	0.0029	3.05	0.0036	6.47	0.0040
	20	2.88	0.0026	7.84	0.0142	10.72	0.0154
	25	1.31	0.0024	12.03	0.0248	13.34	0.0260
	30	0.62	0.0022	14.93	0.0332	15.55	0.0336
	35	0.73	0.0021	21.32	0.0505	22.05	0.0503
	40	1.06	0.0020	21.82	0.0479	22.88	0.0493
	45	0.74	0.0015	22.33	0.0793	23.07	0.0816
	55	0.1	0.0014	20.24	0.1213	20.34	0.1126

En el Tabla 2, la columna *Vol_residuos* es la suma del volumen de la punta más el volumen de las ramas. El mayor porcentaje de residuos en forma de puntas se obtuvo en las categorías diamétricas pequeñas; por ejemplo, el grupo de especie 10 (*P. douglasiana*) presentó el mayor porcentaje de este volumen con 15.07, 3.69 y 1.47% en las categorías diamétricas 10, 15 y 20 cm, seguido de las especies 2 (*P. durangensis*), 3 (*P. engelmannii*), 175 (*Quercus spp*) y 8 (*P. ayacahuite*) con 14.51, 10.72, 7.94 y 5.47%, respectivamente. La desviación estándar del porcentaje de volumen de las puntas en estas categorías diamétricas (10 - 20 cm) osciló desde 0.0016% (*P. engelmannii*) hasta 0.0042% (*P. oocarpa*).

Como era de esperarse, el mayor volumen de residuos se concentra en las ramas, donde los encinos (sp = 175) presentaron el mayor porcentaje con valores superiores a 20% a partir de la categoría diamétrica de 35 cm (Tabla 2), es decir, en árboles mayores de 35 cm de dap, el volumen de ramas de los encinos representa casi la cuarta parte del volumen total. El mayor porcentaje promedio de volumen de ramas en las categorías diamétricas a partir de 35 cm lo presentó el grupo de especies 175 (*Quercus spp.*) con 21.42%, seguido de las especies 7 (*P. lumholtzii*), 9 (*P. oocarpa*), 3 (*P. engelmannii*) y 11 (*P. michoacana*), con 10.48, 6.76, 5.62 y 5.11%, respectivamente. La especie con el menor porcentaje de volumen de ramas en las categorías de 35 cm y mayores fue la 8 (*P. ayacahuite*) con 2.98% (Tabla 2).

La Figura 3 muestra la tendencia del porcentaje que representa el volumen de residuos respecto al volumen total del árbol (VTA) para las especies y grupos de especies consideradas en este estudio. Se observa que en todos los casos el volumen de residuos provenientes de las puntas disminuye conforme aumenta el tamaño del árbol, esto es, el diámetro normal. Esta tendencia es lógica, ya que en árboles de las categorías diamétricas pequeñas, el diámetro mínimo para considerar la parte superior del árbol como punta (5 cm) se presenta, incluso, cerca de la altura del pecho, por lo que en ocasiones más del 70% del volumen del árbol es considerado como punta. Caso contrario, en los árboles grandes, el porcentaje del volumen de las puntas respecto al volumen total es muy pequeño.

En relación al volumen de las ramas, en la mayoría de los casos el porcentaje aumenta conforme aumenta el diámetro normal, lo cual está asociado con la madurez del árbol, donde a mayor edad éste presenta (normalmente) menor número de ramas pero mucho más gruesas.



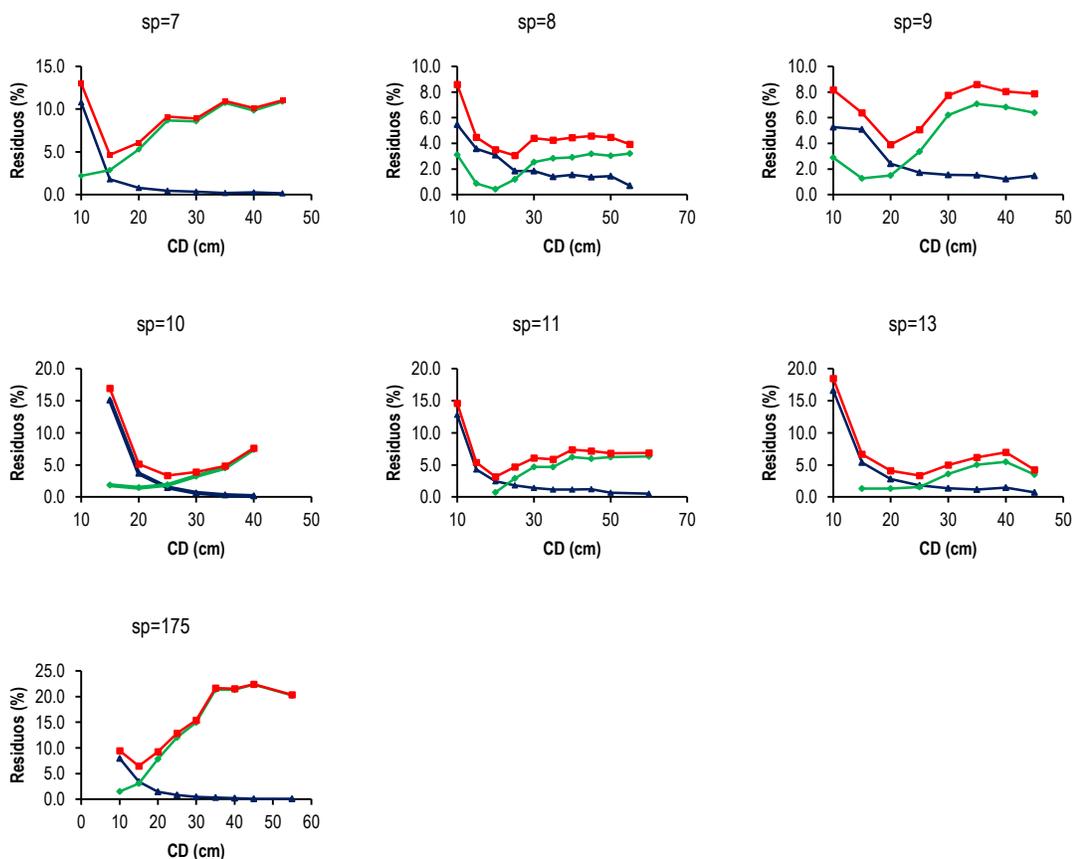


Figura 3. Porcentaje del VTA que representa el volumen de ramas (línea verde), el volumen de la punta (línea azul) y el volumen total de residuos (línea roja) por categoría diamétrica por especie

Esto puede deberse a la morfología de las especies ya que los árboles jóvenes presentan mayor crecimiento (crecimiento exponencial) y, por lo tanto, presentan ramas delgadas y una buena poda natural.

5.5.2. Modelos para predecir el volumen de residuos forestales

En la Tabla 3 se muestran los estimadores de los parámetros, el error estándar y la significancia, así como los estadísticos de bondad de ajuste del modelo alométrico (Ecuación 2) que fueron examinados; la raíz del error cuadrático medio (RMSE), que mide la exactitud de las estimaciones y el coeficiente de determinación ajustado (R_a^2), que muestra la proporción de la varianza total que es explicada por el modelo, ajustado por el número de parámetros del modelo y el número de observaciones.

Tabla 3. Parámetros estimados y estadísticos de bondad de ajuste del modelo alométrico

Sp	Parm	θ_i	StdE	t-value	P > t	RMSE	R_a^2
1	a ₀	0.000009	0.000005	1.64	0.0928	0.0018	0.7804
	a ₁	2.136932	0.2803	7.62	<.0001		
	a ₂	0.688671	0.2671	2.58	<.0108		
2	a ₀	0.00001	0.000005	1.88	0.0622	0.0008	0.8358
	a ₁	2.261934	0.2032	11.13	<.0001		
	a ₂	0.340109	0.1771	1.92	0.0563		
3	a ₀	0.00001	0.000004	2.13	0.0350	0.0006	0.8786
	a ₁	2.303995	0.1966	11.72	<.0001		
	a ₂	0.511378	0.1647	3.10	0.0022		
4	a ₀	0.000013	0.000008	1.48	0.1411	0.0009	0.7294
	a ₁	1.87904	0.1892	9.93	<.0001		
5	a ₀	0.000011	0.000008	1.25	0.1143	0.0009	0.7734
	a ₁	1.974993	0.2998	6.59	<.0001		
	a ₂	0.832715	0.2316	3.59	0.0004		
6	a ₀	0.00004	0.000016	2.42	0.0166	0.0006	0.7704
	a ₁	1.57377	0.1164	13.53	<.0001		
7	a ₀	0.000007	0.000002	2.46	0.0156	0.0006	0.8450
	a ₁	2.57172	0.1850	13.90	<.0001		
	a ₂	0.310612	0.1920	1.62	0.1087		
8	a ₀	0.000027	0.000011	2.57	0.0117	0.0001	0.8587
	a ₁	1.857894	0.1825	10.18	<.0001		
	a ₂	0.544918	0.2174	2.51	0.0137		
9	a ₀	0.000047	0.000025	1.92	0.0561	0.0012	0.6448
	a ₁	1.570357	0.1486	10.57	<.0001		
10	a ₀	0.00000006	0.000003	2.45	0.0150	0.0003	0.8326
	a ₁	2.332987	0.1451	16.08	<.0001		
	a ₂	0.41663	0.1161	3.59	0.0004		
11	a ₀	0.000011	0.000004	2.31	0.0224	0.0005	0.8491
	a ₁	2.308282	0.1666	13.85	<.0001		
	a ₂	0.368689	0.1539	2.40	0.0180		
13	a ₀	0.000053	0.000042	1.25	0.1641	0.0002	0.7299
	a ₁	1.731934	0.3564	4.86	<.0001		
	a ₂	0.529313	0.2683	1.97	0.0518		
170	a ₀	2.288E-6	9.772E-7	2.34	0.0204	0.0249	0.883
	a ₁	2.549742	0.1550	16.45	<.0001		
	a ₂	0.797396	0.1469	5.43	<.0001		
172	a ₀	0.000137	0.000060	2.29	0.0233	0.0322	0.792
	a ₁	1.539489	0.1458	10.56	<.0001		
	a ₂	0.707872	0.1342	5.28	<.0001		

Sp= especies, Parm = Parámetros del modelo, θ_i = Estimador del parámetro, StdE= Error estándar, t-Value= Valor de probabilidad de la distribución *t* de student, P > | t | probabilidad calculada, RMSE= Raíz del Error Cuadrático Medio y R_a^2 = Coeficiente de determinación ajustado.

Todos los parámetros fueron significativos a un nivel de significancia (α) del 5%, excepto para las especies 1, 2, 4, 5, 9 y 13, donde el parámetro a₀ escasamente excede dicho nivel y es un parámetro independiente en la ecuación por lo cual no se elimina, porque sin él no existiría el modelo; en las especies 1 y 7 el

parámetro a_2 ligeramente excede el nivel de significancia (α) del 5% y en las especies 4 y 6 fue eliminado; el modelo propuesto tiene la dificultad de medición del diámetro de copa; pero de acuerdo a Fassola *et al.* (2008) así se tienen mayores criterios con fundamentos biológicos (que no determinísticos), para que dichos modelos permitan predecir la acumulación de tejidos en árboles, la arquitectura de la copa y consecuentemente la estructura de las ramas; por otra parte presentó los mejores ajustes (R_a^2 y RMSE).

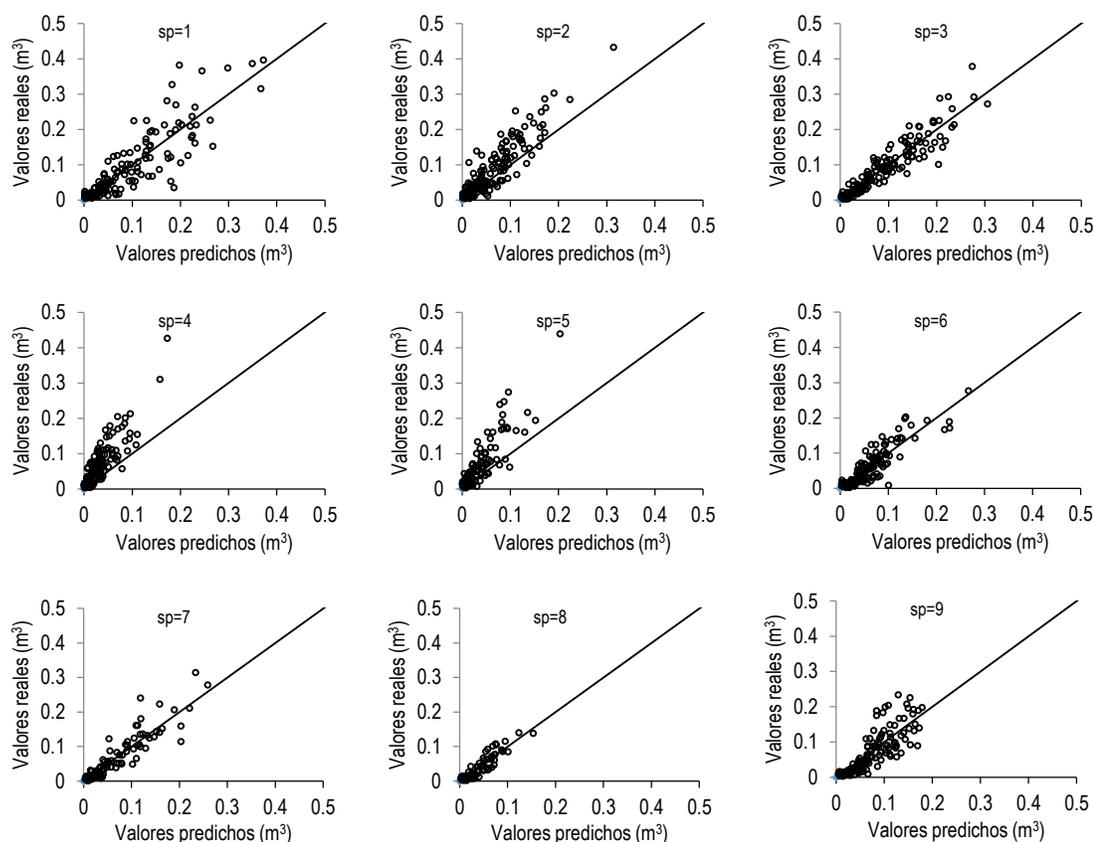
El problema de heterocedasticidad asociada al volumen de residuos fue corregido con una función de potencia de la varianza del residual $\sigma_1^2 = (D^2C)^\emptyset$ con el D y la C como variables independientes (Crecente-Campo *et al.*, 2009). El valor más razonable del término no exponencial \emptyset debería proveer la gráfica más homogénea de residuales estandarizados (Huang *et al.*, 2000). El error estimado del modelo no ponderado ($\hat{\epsilon}_i$) fue usado como la variable dependiente en la varianza del error del modelo ($\hat{\epsilon}_i^2 = \emptyset_0 (D^2C)^{\emptyset_1}$). Los parámetros fueron estimados y programados en el procedimiento PROC MODEL de SAS/ETS™ (SAS Institute Inc., 2011), con la especificación $resid.vr = resid.vr/sqrt(1/(d^{2*c})^{ldc})$.

Los mejores resultados se obtuvieron ajustando cada especie por separado (Tabla 3) con RMSE y StdE más bajos para la predicción de residuos forestales por especie (0.0001 y 0.000002, respectivamente) y presentando mejores R_a^2 (0.883). Todas las estimaciones indican que el ajuste de cada especie por separado en base a la ecuación alométrica, tienen una tendencia exitosa como predictor.

Los valores de la tabla muestran además que la R_a^2 para cada grupo de especies osciló entre 0.64 y 0.88; los valores relativamente bajos se deben en parte a la gran dispersión que presenta el volumen de residuos para una misma categoría diamétrica por especie (Figura 4). No obstante, estos valores de R_a^2 se encuentran por encima del rango reportado en otros estudios; como lo que argumentan Bouriaud *et al.*, (2013), quienes reportan valores de R^2 menores de 0.5 al ajustar un modelo similar al que fue utilizado en este estudio, para cuantificar los residuos del aprovechamiento forestal en bosques mixtos de *Picea*

y *Fagus* en Rumania. En la Figura 4 se presentan los valores observados vs los valores predichos por el modelo de volumen total (m^3) de residuos y la línea de tendencia relación 1 a 1.

Rodríguez-Ortiz y colaboradores ajustaron varios modelos para estimar la biomasa aérea y foliar en plantaciones de pino de rápido crecimiento en Oaxaca (*Pinus patula* y *P. taeda*), siendo el de mejor ajuste el mismo que se empleó en este trabajo, reportando valores para la estimación de biomasa en ramas sin acícula de R^2 0.92, tomando como variable independiente la biomasa de ramas (sin acículas) por árbol (kg) y como variables dependientes el diámetro medido al inicio de la copa viva (cm) y el área de copa (cuadrado del diámetro de copa en m) en una ecuación no lineal. Esto coincide con lo encontrado para *P. sylvestris* ($R^2 = 0.9$) por Jonckheere *et al.* (2005).



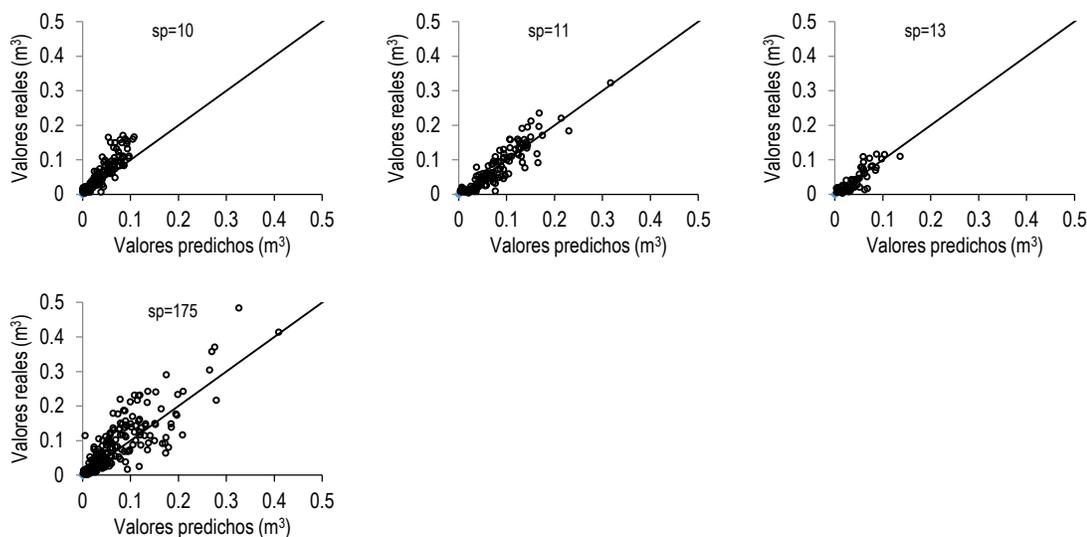


Figura 4. Valores observados vs valores predichos de volumen total (m^3) de residuos y la línea de tendencia relación 1 a 1

La dispersión de los datos de volumen muestran en general un buen ajuste analizándolos con la línea relación 1 a 1, ya que si están bien ajustados deberán seguir la diagonal; en caso de que los datos estén siempre por encima de la diagonal estarán subestimando los predichos y en el caso de que los datos estén siempre por debajo de la diagonal estarán sobreestimando los predichos.

5.5.3. Disponibilidad de biomasa residual

Con el modelo anterior (Ecuación 2), se puede estimar la cantidad de residuos disponibles a nivel árbol por especie; no obstante, se pueden realizar dichas estimaciones para un conjunto de árboles de un subrodal, rodal o predio, únicamente basta con calcular este valor para el árbol tipo por especie y categoría diamétrica que se encuentran presentes en el rodal y multiplicarlos por el número de árboles de dichas categorías.

Se revisaron 35 programas de manejo forestal maderable de la UMAFOR 1008 para calcular el volumen total de la distribución de productos (primario, secundario, celulósico y desperdicio) por predio, 15 ejidos fueron descartados por ser ecológicamente o económicamente no viables. Los resultados indican que el promedio anual de la producción forestal maderable de los ejidos evaluados es de 2'837,373 y 736,314 m^3 RTA de pino y encino respectivamente, y alrededor

de 56,403 m³ de residuos forestales pueden utilizarse en promedio en cada anualidad durante todo el ciclo de corta (10 años), para generar energía renovable en la región de El Salto, Durango.

5.5.4. Comparación de la ecuación de volumen entre las especies

En el Anexo I se presentan los estimadores de los parámetros, el error estándar y la significancia, así como los estadísticos de bondad de ajuste del modelo completo que fueron examinados; la raíz del error cuadrático medio (RMSE), que mide la exactitud de las estimaciones y el coeficiente de determinación ajustado (R_a^2), que muestra la proporción de la varianza total que es explicada por el modelo ajustado, por el número de parámetros y el número de observaciones.

El modelo completo que describe la diferencia entre los parámetros del volumen total de residuos, ajustado con variables indicadoras para la especie que presento el mayor número de observaciones en cada comparación, resultó estadísticamente mejor ($p \leq 0.01$) que el modelo reducido, de acuerdo con la prueba de F generalizada (Washington *et al.*, 2011) y los estadísticos usados para medir el ajuste.

La estrategia del presente estudio fue encontrar las diferencias entre todas las especies para verificar si se lograban agrupar en una sola. Así, el modelo completo describe las diferencias por adición de los parámetros que describen el volumen de residuos, a la especie que presentó el mayor número de observaciones en cada comparación. Los parámetros con adiciones no significativas ($p > 0.05$) fueron eliminados al realizar cada comparación entre especies.

Los valores de RMSE y StdE del modelo completo de las predicciones del volumen de residuos fueron más bajos en la mayoría de las comparaciones a los obtenidos utilizando el modelo reducido, además la eficacia del modelo fue mejor (R_a^2). El modelo completo con variables indicadoras presenta ventajas importantes en cuanto al modelo reducido en un 86.57 %, excepto en las

comparaciones de las especies (1 y 5), (1 y 13), (2 y 8), (4 y 8), (4 y 13), (5 y 8), (7 y 9), (9 y 11), (9 y 13) y (170 y 172), ya que el primero asume las diferencias en los parámetros de la ecuación alométrica.

En las especies de encino los mejores resultados de RMSE y R_a^2 se obtuvieron ajustando un modelo para cada especie individual (0.0249 y 0.883, respectivamente); pero al realizar el ajuste con variables dummy (modelo completo) y ajustes globales (modelo reducido) combinando ambas especies se encontró que no existe ganancia en cuestión de errores de trabajar con un modelo u otro, motivo por el cual las especies se agruparon en una sola.

El modelo reducido que describe el ajuste global para todas las especies, considera el volumen total de residuos similar para algunas especies, únicamente el 13.43 % de las comparaciones entre las especies. Se puede deducir que el ajuste del modelo reducido fue menor que los otros dos enfoques (ajuste de una ecuación para cada especie por separado y modelo completo con variables indicadoras) Se realizó la prueba estadística de F generalizada para verificar dichos resultados.

En el Anexo II se pueden observar los estimadores de los parámetros, sus errores estándar y los estadísticos de ajuste para el volumen de residuos forestales del modelo reducido.

Para comparar el modelo completo con el modelo reducido se empleó la prueba de F generalizada (Washington *et al.*, 2011); en la Tabla 4 se presentan los resultados estadísticos de la prueba de F generalizada.

Tabla 4. Prueba de F generalizada

Sp	SSE (R)	df _R	SSE (F)	df _F	F*	Pr F
1y2	0.4814	358	0.4577	357	18.48	0.0001
1y3	0.5164	330	0.4062	329	89.25	0.0001
1y4	0.4324	338	0.4213	335	2.94	0.0331
1y5	0.4332	312	0.4247	309	2.06	0.1053
1y6	0.3965	341	0.3908	340	4.95	0.02
1y7	0.4292	271	0.3731	270	40.59	0.0001
1y8	0.3196	270	0.3113	269	7.12	0.007
1y9	0.4900	324	0.4624	323	19.27	0.0001
1y10	0.3702	381	0.3580	380	12.94	0.0003
1y11	0.4003	305	0.3821	304	14.47	0.0001

Factibilidad del uso de los residuos del aprovechamiento forestal para propósitos bioenergéticos en la región de El Salto, Durango

Sp	SSE (R)	df _R	SSE (F)	df _F	F*	Pr F
1y13	0.3170	251	0.3148	248	0.57	0.6301
2y3	0.4681	357	0.2681	356	265.57	0.0001
2y4	0.3076	365	0.2863	364	27.08	0.0001
2y5	0.3017	339	0.2888	337	7.52	0.0006
2y6	0.2522	368	0.2414	366	8.18	0.0003
2y7	0.4009	298	0.2288	297	223.39	0.0001
2y8	0.1766	297	0.1734	294	1.80	0.1456
2y9	0.3877	351	0.3210	350	72.72	0.0001
2y10	0.2589	408	0.2198	407	72.40	0.0001
2y11	0.3010	332	0.2410	331	82.40	0.0001
2y13	0.1862	278	0.1802	277	9.22	0.0026
3y4	0.3356	337	0.2392	336	135.41	0.0001
3y5	0.3978	311	0.2396	309	102.01	0.0001
3y6	0.3099	340	0.1970	339	194.27	0.0001
3y7	0.2083	270	0.1806	269	41.25	0.0001
3y8	0.2194	269	0.1244	268	204.66	0.0001
3y9	0.2742	323	0.2638	322	12.69	0.0004
3y10	0.1838	380	0.1715	379	27.18	0.0001
3y11	0.2140	304	0.1882	303	41.53	0.0001
3y13	0.1434	250	0.1295	249	26.72	0.0001
4y5	0.2784	319	0.2574	317	12.93	0.0001
4y6	0.2251	348	0.2205	347	13.50	0.0001
4y7	0.3280	278	0.1979	277	7.239	0.0074
4y8	0.1572	277	0.1418	274	9.91	0.0001
4y9	0.3118	331	0.2851	330	30.90	0.0001
4y10	0.2074	388	0.1902	387	34.99	0.0001
4y11	0.2262	312	0.2104	311	23.35	0.0001
4y13	0.1506	258	0.1472	255	1.96	0.1199
5y6	0.2371	322	0.2256	320	8.15	0.0001
5y7	0.3608	252	0.2153	251	169.62	0.0001
5y8	0.1507	251	0.1452	248	3.13	0.0262
5y9	0.3582	305	0.2828	303	40.39	0.0001
5y10	0.2248	362	0.1915	360	31.30	0.0001
5y11	0.2649	286	0.2268	285	47.87	0.0001
5y13	0.1596	232	0.1550	231	6.85	0.0094
6y7	0.2774	281	0.1540	280	224.36	0.0001
6y8	0.1030	280	0.0971	279	16.95	0.0001
6y9	0.2700	334	0.2260	333	64.83	0.0001
6y10	0.1654	391	0.1480	389	22.86	0.0001
6y11	0.1921	315	0.1609	314	60.88	0.0001
6y13	0.1036	261	0.1023	258	1.09	0.3526
7y8	0.2162	210	0.0856	209	318.87	0.0001
7y9	0.2691	264	0.2193	261	19.75	0.0001
7y10	0.1951	321	0.1309	319	78.22	0.0001
7y11	0.2120	245	0.1485	244	104.33	0.0001
7y13	0.1399	191	0.0908	190	102.74	0.0001
8Y9	0.2162	263	0.1657	262	79.84	0.0001
8Y10	0.1035	320	0.0793	319	97.34	0.0001
8Y11	0.1327	244	0.0937	243	101.14	0.0001
8Y13	0.0392	190	0.0353	189	20.88	0.0001
9Y10	0.2202	374	0.2140	372	5.38	0.0049
9Y11	0.2308	298	0.2280	295	1.20	0.3071
9Y13	0.1784	244	0.1701	241	3.91	0.0092
10Y11	0.1435	355	0.1405	353	3.76	0.0240

Factibilidad del uso de los residuos del aprovechamiento forestal para propósitos bioenergéticos en la región de El Salto, Durango

Sp	SSE (R)	df _R	SSE (F)	df _F	F*	Pr F
10Y13	0.0846	301	0.0830	300	5.78	0.0167
11Y13	0.1021	225	0.0992	224	6.54	0.0111
170y 171	05.0006	309	4.9293	306	1.475	0.2212

Sp= especies, SSE (R) = Suma de cuadrados del error del modelo reducido, dfr= Grados de libertad del error en el modelo reducido, SSE (F) = Suma de cuadrados del error en el modelo completo, dff = Grados de libertad del error en el modelo completo, F* = Valor calculado de la prueba de F y Pr | F | = Probabilidad calculada.

Se realizó cada posible comparación entre especies de pino y el 86.57% de los valores de F resultaron significativos al nivel de significancia del 5%, lo que denota que los modelos son significativamente diferentes y no se pueden agrupar las especies. En el caso de los encinos (especies 170 y 172) los valores de F no resultaron significativos a un nivel del 5%, por esta razón se puede utilizar un modelo único (parámetros únicos) porque la ganancia en cuestión de errores no es significativa en cuestión de trabajar con un modelo u otro y se pueden agrupar las especies de encino en una sola (especie 175).

5.6. CONCLUSIONES

En este estudio se realizó una estimación de la cantidad de residuos de biomasa forestal mediante el uso de relaciones alométricas para las especies de pino y encino de la región de El Salto, Durango, como una alternativa para la generación de bioenergía; además se utilizó el método de estimación de parámetros con variables ficticias o 'dummy', para confirmar si se lograban agrupar las especies en una sola (parámetros únicos), hipótesis que fue descartada al realizar los ajustes en el caso de las especies de pino, ya que el mejor enfoque fue ajustar una ecuación para cada especie por separado, en el caso de los encinos si se lograron agrupar las especies.

A diferencia de otros estudios, donde la estimación de biomasa residual para árboles individuales se realiza utilizando el peso seco como variable independiente, en este estudio se ajustó un modelo alométrico (Ecuación 2), en el que se utilizaron variables relacionadas como el diámetro normal y la longitud

de copa (variables dependientes) y el volumen de residuos (variable independiente).

La ecuación ajustada en este trabajo será específica para estimar el volumen de residuos forestales en la región de El Salto, Durango, con posibilidades de realizar estimaciones estatales o nacionales del recurso de biomasa residual y así reducir la incertidumbre en las estimaciones de residuos de biomasa.

5.7. LITERATURA CITADA

Bouriaud, O., Stefan, G. & Flocea, M. (2013, March 17). Predictive models of forest logging residues in Romanian spruce and beech forests. *Biomass and Bioenergy*, 54, pp 8.

Cieszewski C. J. & Bailey, R. L. 2000. Generalized Algebraic Difference Approach: Theory based derivation of dynamic site equations with polymorphism and variable asymptotes. *For. Sci.* 46:116–126.

Crecente-Campo, F., Rojo, A. & Diéguez-Aranda, U. 2009. A merchantable volume system for *Pinus sylvestris* L. in the major mountains ranges of Spain. *Ann. For. Sci.* 66 (808): 1-12.

Draper, R. & Smith, H. 1981. *Applied Regression Analysis*. Second Ed. John Wiley & Sons. USA. 709 p.

Evans, A., Strezov, V. y Evans, T. J. (2010). "Sustainability considerations for electricity generation from biomass". *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 14 1419-1427.

FAO (2010). "What woodfuels can do to mitigate climate change". *FAO Forestry Paper* 162. Rome, Italy.

Fassola, H., Crechi, E., Barth, S., Keller, A., Pinazo, M., Martiarena, R., Von Wallis, A. & Figueredo, I. 2008. Relación entre la biomasa aérea y la sección transversal en la base de copa viva de *Pinus taeda* L. en el norte de la provincia de Misiones, Argentina. In: XIII Jornadas Técnicas Forestales y Ambientales. Facultad de Ciencias Forestales, UNaM-EEA Montecarlo, INTA. El Dorado, Misiones, Argentina.

- Huang, S., Price, D. & Titus, S. J. 2000. Development of ecoregion-based height-diameter models for white spruce in boreal forests. *For. Ecol. Manage.* 129: 125-141.
- Jonckheere, I. S., Muys, B. & Copping, P. 2005. Allometry and evaluation of in situ optical LAI determination in Scots pine: a case study in Belgium. *Tree Physiology* 25: 723-732.
- Karjalainen, T., Asikainen, A., Ilavsky, J., Zamboni, R., Hotari, K. E. & Röser, D. 2004. Estimation of energy wood potential in Europe. Working Papers Finnish Forest Research Institute 6p. <http://www.metla.fi/julkaisut/workingpapers/2004/mwp006.pdf>.
- Montgomery, D. C. & Peck, E. A. 1982. *Introduction to Linear Regression Analysis*. John Wiley & Sons. New York, U. S. A. 504 p.
- Rodríguez-Ortiz, G., De los Santos-Posadas, H. M., González-Hernández, V. A., Aldrete, A., Gómez-Guerrero A. & Fierros-González, A. M. (2012) Modelos de biomasa aérea y foliar en una plantación de pino de rápido crecimiento en Oaxaca. *Madera y Bosques* 18(1):25-41.
- SAS (Statistical Analysis System) Institute Inc. 2011. *SAS/ETS® 9.3 User's Guide*. Cary, NC. SAS Institute Inc. pp: 1023-1335.
- Vargas-Larreta, B., Len B. E., Mendoza, A., Vázquez, A. & Kennedy, M. (2010). Implicaciones del mercado de carbono en el manejo de los bosques templado-fríos del noroeste de México. 2015, Sitio web: http://www.cnf.org.pe/secretaria_conflat/memorias/DOCUMENTO%20MESAS/MESA%201/Benedicto%20Vargas.pdf
- Washington, S. P., Karlaftis, M. G. & Mannering, F. L. 2011. *Statistical and Econometric methods for transportation data analysis*. A Chapman & Hall Book/CRC Taylor & Francis Group. Second Edition. New York, NY, USA. pp. 106-109.
- Weisberg, S. 1980. *Applied Linear Regression*. John Wiley & Sons. New York, U. S. A. 323 p.

6. POTENCIAL ECONÓMICO DE LOS RESIDUOS FORESTALES PARA LA GENERACIÓN DE BIOENERGÍA

6.1. RESUMEN

En este capítulo se presentan los resultados de un análisis económico de la generación de energía renovable a partir de residuos de biomasa forestal mediante un sistema de gasificación en la región de El Salto, Durango; las estimaciones se realizaron tentativamente para un periodo de 10 años, donde se evaluaron los costos de operación, la eficiencia energética y las emisiones de CO₂ evitadas por el cambio en el tipo de generación de energía eléctrica, en base a la posibilidad de cosecha de 20 ejidos de la UMAFOR 1008, El Salto. Los resultados de los indicadores financieros revelan que es viable producir bioenergía a partir de residuos forestales con una tasa de descuento del 10%.

Conjuntamente la reducción potencial de emisiones de gases de efecto invernadero por el cambio en el tipo de generación de energía eléctrica, se estiman en 15, 793 tCO₂e año⁻¹.

6.2. ABSTRACT

In this chapter presents the results of an economic analysis of the generation of renewable energy from forest through a system of gasification biomass waste in the region of El Salto, Durango; the estimates were tentatively for a period of 10 years, where we evaluated the costs of operation, energy efficiency and emissions of CO₂ avoided by the change in the type of electric power generation, based on the possibility of harvest of 20 ejidos of the UMAFOR 1008, El Salto. The results of the financial indicators reveal that it is viable to produce bioenergy from forestry waste with a discount rate of 10%.

Together the potential reduction of emissions of greenhouse gases by the change in the type of electricity generation, estimated at 15, 793 tCO₂e year⁻¹.

6.3. INTRODUCCIÓN

En la actualidad existen una serie de factores internacionales que justifican la necesidad del avance tecnológico hacia el uso sostenible de los recursos naturales como fuente de energía renovable.

En términos de conversión energética de biomasa a electricidad, destaca el desarrollo tecnológico y comercial que ha tenido la gasificación, debido a su flexibilidad y relativamente alta eficiencia con respecto a las tradicionales por combustión (FAO, 2008). La gasificación de biomasa convencional es la combustión incompleta de materiales de biomasa en una alta temperatura, oxígeno limitado en un ambiente. Esta combustión incompleta permite un mayor rendimiento de la energía (a través de gas) de la biomasa que la combustión convencional de la biomasa para la producción de vapor, (Craig y Mann, 1996).

El aprovechamiento de los residuos forestales requiere optimizar los procesos de extracción, transporte, selección y transformación. El concepto debe ser económicamente atractivo, ecológicamente sostenible y aceptado por la sociedad. Esto significa que el aprovechamiento energético de los residuos forestales debe quedar supeditado al correcto manejo de las masas forestales. Un incorrecto diseño de las operaciones forestales sería tener como objetivo prioritario la obtención de combustibles, presentándose el riesgo de realizar un sistema de producción no sostenible (Campos y Marcos, 2002).

La utilización de la biomasa residual como fuente de energía renovable en la región de El Salto, generaría, por una parte, información más exacta de la estimación de residuos forestales en la región, y por otra parte, se podría utilizar la biomasa residual que no se está utilizando en la actualidad; también contribuiría a mejorar el potencial socioeconómico favoreciendo hoy en día y en el futuro la situación de las regiones forestales de nuestro país:

6.4. MATERIALES Y MÉTODOS

6.4.1. Disponibilidad total de residuos

Una vez conocida la proporción que representan las ramas y puntas respecto al volumen total, se recopiló información sobre las posibilidades de corta de los ejidos evaluados en la UMAFOR 1008, El Salto; de los 35 ejidos que se analizaron inicialmente fueron descartados 15, ya que al realizar las estimaciones para la extracción de biomasa se tomó como criterio de restricción para su evaluación, a aquellos ejidos que tenían una posibilidad anual menor a 5,000 m³, esto porque los costos de extracción incrementarían considerablemente debido al poco volumen estimado como residuos; el proceso de cuantificación de los residuos totales por ejido consistió en calcular la diferencia entre el volumen total de corta y el volumen utilizable de los fustes. El volumen utilizable está compuesto por los rollos aserrables y por otros productos no aserrables (primarios o secundarios). Los desperdicios del fuste estuvieron compuestos, a su vez, por la porción apical con diámetros que oscilaron entre 5 y 10 cm, y por la porción de los rollos y productos defectuosos.

Se identificaron los tratamientos silvícolas más importantes, turno, remociones promedio por hectárea y por año en cada predio. Con esta información, se determinó la cantidad de residuos de biomasa que puede generarse anualmente durante todo el ciclo de corta. En la Tabla 5 se presentan los 20 ejidos que fueron evaluados en este estudio.

Tabla 5. Ejidos evaluados en el estudio

Ejidos evaluados	
1 Adolfo Ruíz Cortines	11 Lo Negros
2 Borbollones Ampliación Y Dotación	12 Los Bancos
3 Chavarría Nuevo	13 Mil diez
4 Chavarría Viejo	14 Nueva Patria
5 El Brillante	15 Pueblo Nuevo
6 El Tule lotes 2,3,4 y 5	16 San Antonio de las Bas.
7 La Campana	17 San Antonio y Anexos
8 La Ciudad	18 San Francisco. Y Santa Eduwiges
9 La victoria	19 San José de Ánimas
10 Laguna del Progreso	20 Santa Lucia

6.4.2. Potencial bioenergético de la biomasa forestal

Para calcular la capacidad de esta generación de energía eléctrica constante anual, The Pembina Institute (Kennedy, 2008), reporta las siguientes equivalencias entre unidades de energía:

- 1 m³ madera = 460 kg de biomasa seca de pino
- 1 m³ de madera = 640 kg de biomasa seca de encino
- 1 GWh = 346 ton de biomasa seca
- 1 GWh = 1' 000, 000 kWh

6.4.3. Cálculo de las emisiones de CO₂ evitadas

Para estimar la reducción potencial de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI), (emitidas por la utilización de carbono fósil que tradicionalmente se utiliza en el proceso para producir energía eléctrica) por el cambio en el tipo de tecnología para producir energía eléctrica a partir de residuos de biomasa forestal, se utilizaron los resultados reportados por The Pembina Institute (Kennedy, 2008). En dicho trabajo se reporta que una tonelada de biomasa quemada a través de un sistema de gasificación podría producir 0.54 toneladas de CO₂ equivalente (tCO₂e) de reducción de emisiones.

6.4.4. Análisis económico de la producción de bioenergía

El estudio de prefactibilidad para implementar un sistema de gasificación a partir de residuos de biomasa forestal se realizó mediante la construcción de una tabla de flujo de efectivo, tentativamente para un periodo de diez años. En ella se incluyeron detalles de costos específicos; por una parte, los factores técnicos tales como los requerimientos de energía actuales (CFE 2015) y futuros (domésticos, comerciales y de pequeñas industrias), costos de las instalaciones, equipos y operación de la planta, recursos humanos necesarios para la operación de los mismos, costos de la materia prima (residuos forestales), transformación de la materia prima, transporte, mantenimiento de equipos, conexiones a la red eléctrica, etc. y por otra parte los aspectos socioeconómicos, tales como el

número de usuarios, la administración y operación de la planta, la capacidad de pago de los habitantes de la región, etc.

6.4.5. El criterio del valor actual neto (VAN)

Para analizar los ingresos o beneficios de la producción de bioenergía, se utilizó como base de cálculo los criterios de decisión de inversiones para determinar las implicaciones en relación beneficio-costos y el tiempo de ocurrencia de este.

Este criterio plantea que el proyecto debe aceptarse si su valor actual neto (VAN) es igual o superior a cero, donde el VAN es la diferencia entre todos sus ingresos y egresos expresados en valor actual. Para el cálculo del valor actual neto (VAN) propuesto por Sapag y Sapag (2000), se empleó mediante la fórmula:

$$VAN = \sum_{t=1}^n \frac{Y_t}{(1+i)^t} - \sum_{t=1}^n \frac{E_t}{(1+i)^t} \quad [7]$$

Donde:

Y_t = ingresos del proyecto

E_t = egresos del proyecto

i = tasa de descuento

Aunque es posible aplicar esta ecuación, la operación se puede simplificar a una sola actualización mediante:

$$VAN = \sum_{t=1}^n \frac{Y_t - E_t}{(1+i)^t} \quad [8]$$

6.4.6. El criterio de la tasa interna de retorno (TIR)

El criterio de la tasa interna de retorno (TIR) evalúa el proyecto en función de una única tasa de rendimiento por periodo, con la cual la totalidad de los beneficios actualizados son exactamente iguales a los desembolsos expresados en moneda actual (que es lo mismo que calcular la tasa que hace al VAN del proyecto igual a cero). Como señalan Bierman y Smidt (1997), la TIR "representa la tasa de

interés más alta que un inversionista podría pagar sin perder dinero, si todos los fondos para el financiamiento de la inversión se tomaran prestados y el préstamo (principal e interés acumulado) se pagara con las entradas en efectivo de la inversión a medida que se fuesen produciendo”. Aunque ésta es una apreciación muy particular de estos autores (no incluye los conceptos de costo de oportunidad, riesgo ni evaluación de contexto de la empresa en conjunto), sirve para aclarar la intención del criterio.

La tasa interna de retorno puede calcularse aplicando la siguiente ecuación propuesta por Sapag y Sapag (2000):

$$TIR = \sum_{t=1}^n \frac{Y_t}{(1+r)^t} - \sum_{t=1}^n \frac{E_t}{(1+r)^t} = 0 \quad [9]$$

Donde:

Y_t = ingresos del proyecto

E_t = egresos del proyecto

r = tasa interna de retorno

Al simplificar y agrupar los términos, se obtiene lo siguiente:

$$TIR = \sum_{t=1}^n \frac{Y_t - E_t}{(1+r)^t} = 0 \quad [10]$$

6.4.7. Cálculos de extracción de biomasa

Los costos de extracción varían según la tipología de biomasa extraída y el sistema mecánico utilizado. Por razones de rentabilidad económica, la biomasa solamente es utilizable a una cierta distancia del lugar de producción. Esta distancia se sitúa entre los 25 y 75 km. Los costos aumentan significativamente para distancias superiores.

El análisis económico se basa en el ahorro logrado al reemplazar la energía generada por la CFE, de elevado costo, por la biomasa, generalmente de bajo costo.

Una forma de evaluar los beneficios y perjuicios de cada uno, es la de comparar sus costos de generación unitarios y las tasas de retorno financiera y económica de cada opción, en base a las inversiones requeridas.

6.5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Se realizó un análisis del volumen de residuos reportados en los programas de manejo de los 20 ejidos evaluados para estimar el potencial bioenergético de éstos en cada predio.

La Figura 5 presenta el volumen autorizado (la posibilidad de cosecha en m^3) de pino (línea verde) y el volumen disponible de residuos (línea anaranjada) durante el ciclo de corta (10 años) en los 20 ejidos evaluados. En estas líneas se puede identificar el volumen total considerado como celulósico y como desperdicio, el cual podría ser utilizado para la generación de bioenergía.

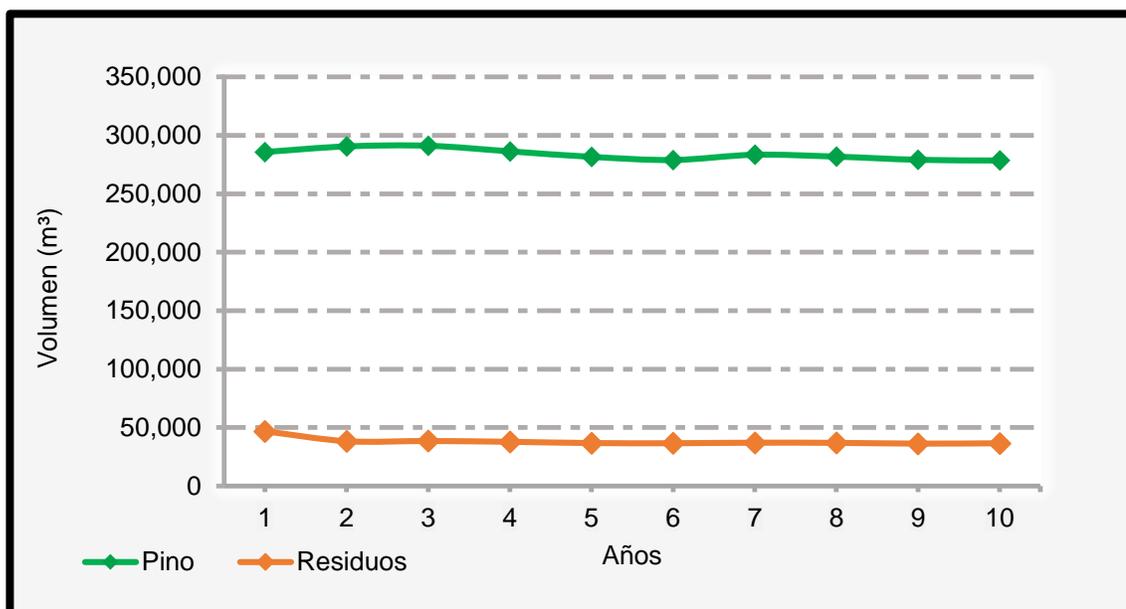


Figura 5. Volumen autorizado de pino m^3 (línea verde) y volumen disponible de residuos m^3 (línea anaranjada) en los ejidos de la región de El Salto

Como se puede observar, el volumen autorizado por anualidad de pino (línea verde) se mantiene constante durante todo el ciclo, lo que garantiza un rendimiento sostenido tanto de volumen aprovechable (línea verde) como de residuos forestales (línea anaranjada), ya que los residuos representan un porcentaje total del volumen de cosecha de aproximadamente el 15%.

La Figura 6 presenta el volumen autorizado (la posibilidad de cosecha en m³) de encino (línea verde) y el volumen disponible de residuos (línea anaranjada) durante el ciclo de corta (10 años) en los 20 ejidos evaluados.

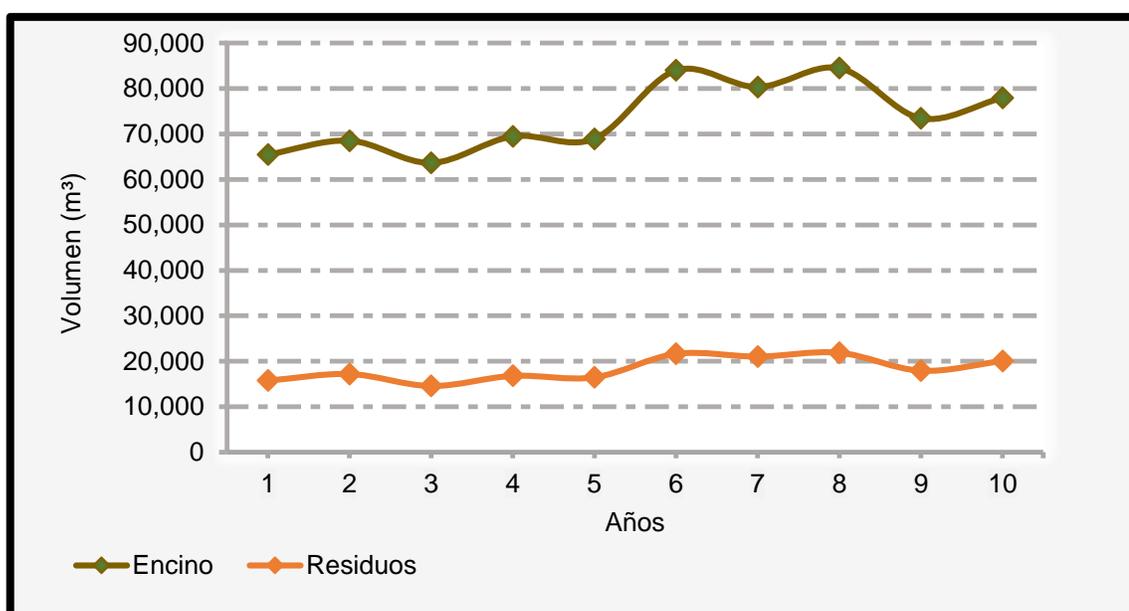


Figura 6. Volumen autorizado de encino m³ (línea café) y volumen disponible de residuos m³ (línea anaranjada) en los ejidos de la región de El Salto

La línea café representa el volumen autorizado de encino durante el ciclo de corta en los ejidos de la región. Como se puede observar, el volumen autorizado se mantiene constante hasta la sexta anualidad, a partir de ahí muestra una tendencia a la alza hasta llegar a la octava anualidad, para después volver a la condición de las primeras anualidades; de estos volúmenes depende la disponibilidad de residuos (línea anaranjada) ya que éstos representan un porcentaje total del volumen de cosecha del 26%.

Estas tendencias permiten saber que se puede contar con un abastecimiento de residuos forestales para propósitos bioenergéticos para establecer un nuevo suministro de energía renovable en la región estudiada.

6.5.1. Volumen de residuos disponibles en la región por ejido

En las Tablas 6 y 7 se presenta el volumen total por distribución de productos de pino y encino, reportado en los programas de manejo forestal de los 20 ejidos evaluados.

Tabla 6. Volumen total por anualidad por grupo de especies de pino de los ejidos de la región de El Salto

Anualidad	Posibilidad	Volumen (m ³)				
		Año	m ³ RTA	Primario y Secundario	Celulósico	Desperdicio
		2007	285,771.98	222,638.88	25,272.73	26,642.77
		2008	290,514.80	235,992.22	20,722.94	21,781.19
		2009	291,078.94	236,826.48	20,639.82	22,029.06
		2010	286,332.23	233,177.68	20,316.96	21,582.38
		2011	281,658.90	229,200.69	19,767.54	20,938.90
		2012	279,002.91	226,901.09	19,615.90	20,930.03
		2013	283,442.88	230,743.00	19,847.67	21,227.24
		2014	281,853.47	228,688.40	19,801.09	21,126.12
		2015	279,158.68	226,762.11	19,482.76	20,693.11
		2016	278,557.74	226,720.47	19,590.33	20,927.20
Total	2,837,372.53	2,297,651.01	205,057.73	217,878.00		

Tabla 7. Volumen total por anualidad por grupo de especies de encino de los ejidos de la región de El Salto

Anualidad	Posibilidad	Volumen (m ³)				
		Año	m ³ RTA	Primario y Secundario	Celulósico	Desperdicio
		2007	65,450.68	47,935.83	8,935.61	8,581.98
		2008	68,524.61	49,400.32	9,721.27	9,401.69

Factibilidad del uso de los residuos del aprovechamiento forestal para propósitos bioenergéticos en la región de El Salto, Durango

2009	63,631.40	47,479.30	8,286.98	7,919.56
2010	69,482.96	50,808.35	9,522.25	9,152.21
2011	68,948.46	50,626.24	9,333.85	8,981.16
2012	84,001.64	59,967.48	12,214.34	11,817.87
2013	80,332.80	56,962.01	11,859.15	11,511.26
2014	84,500.89	60,188.20	12,332.76	11,976.55
2015	73,463.67	53,529.87	10,156.86	9,775.51
2016	77,976.45	55,689.43	11,292.20	10,994.81
Total	736,313.54	532,587.04	103,655.28	100,112.60

El volumen de pino considerado como residuos (celulósico y desperdicio) representa el 7 y 8% del volumen total autorizado, respectivamente; mientras que para el encino los residuos de la cosecha forestal representan el 13% de celulósico y 13% de desperdicio.

6.5.2. Conversión del volumen de residuos forestales a energía eléctrica

En las Tablas 8 y 9 se presentan los KWh disponibles diarios para uso bioenergético de los residuos de pino y encino, respectivamente.

A partir del volumen total (m^3) de residuos, se estimó la cantidad de toneladas de biomasa seca que se pueden generar con este volumen. El siguiente paso fue calcular la capacidad de energía que puede ser generada por anualidad en todo el ciclo de corta; obteniendo un resultado promedio de 84.49 GW con los residuos de pino y encino en todo el ciclo de corta. En la Tabla 8 se presentan los resultados obtenidos de la conversión del volumen total de residuos disponible de pino a KWh.

Tabla 8. Conversión del volumen total de los residuos de pino a kWh

Residuos de Pino						
AÑO	Superficie ha	Total m ³	Biomasa seca (ton)	Gigavatios (GW)	KWh	KWh disponibles diarios
1	11,031	46,724	21,493	62.09	62,093,315	170,119
2	11,350	38,254	17,597	50.84	50,836,896	139,279
3	10,464	38,402	17,665	51.03	51,033,951	139,819
4	11,296	37,709	17,346	50.11	50,113,538	137,297
5	10,079	36,636	16,852	48.69	48,686,773	133,388
6	11,602	36,491	16,786	48.49	48,494,796	132,862
7	11,202	36,967	17,005	49.13	49,127,479	134,596
8	11,878	36,834	16,944	49.95	48,950,827	134,112
9	10,354	36,158	16,633	48.05	48,052,184	131,650
10	10,910	36,466	16,774	48.46	48,460,828	132,769
Total	110,165	380,642	175,095	505.85	505,850,586	1,385,892

Tabla 9. Conversión del volumen total de los residuos de encino a kWh

Residuos de Encino						
AÑO	Superficie ha	Total m ³	Biomasa seca (ton)	Gigavatios (GW)	kWh	kWh disponibles diarios
1	10,122	15,765.83	10,090	29.15	29,150,393	79,864
2	10,052	17,210.66	11,015	31.82	31,821,816	87,183
3	9,984	14,585.89	9,335	26.97	26,968,728	73,887
4	10,597	16,807.01	10,756	31.08	31,075,490	85,138
5	9,259	16,483.51	10,549	30.48	30,477,353	83,500
6	10,475	21,628.99	13,843	39.99	39,991,143	109,565
7	10,318	21,033.37	13,461	38.89	38,889,867	106,548

Factibilidad del uso de los residuos del aprovechamiento forestal para propósitos bioenergéticos en la región de El Salto, Durango

8	12, 308	21, 878.38	14, 002	40.45	40, 452, 249	110, 828
9	10, 942	17, 939.13	11, 481	33.17	33, 168, 740	90, 873
10	10, 087	20, 058.31	12, 837	37.09	37, 087, 008	101, 608
Total	104, 145	183, 391	117, 370	339.08	339, 082, 788	928, 994

De acuerdo con Kennedy (2008), las 29,247 ton de biomasa seca de residuos forestales significarían una generación de bioenergía de 84.49 GW (844'493,337.34 KWh) por año, es decir, 231,489 KWh disponibles por día. En la región de El Salto, los 19,200 usuarios (2015) consumen en promedio 9'038,977.42 KWh por bimestre (CFE, com. pers.), el consumo promedio diario es de 148,586 KWh tarifa (todas), los hogares consumen en promedio al año 1'393,141 KWh, por bimestre 232,190.17 KWh y el consumo promedio diario es de 3,816.82 KWh tarifa (01); las industrias forestales consumen al año alrededor de 4'902,820 KWh, por bimestre 805,943 KWh, con un promedio diario de 13,432 KWh para las tarifas de 3 hilos (66). Por lo tanto, basado en estos resultados los 54'233,865 KWh anuales requeridos para cubrir la demanda de energía eléctrica para estos usuarios, podría satisfacerse fácilmente con un sistema de cogeneración (energía térmica y eléctrica).

En este estudio se estimaron 3'419,078 m³ de volumen total, este resultado es similar al reportado por Pérez-Verdín *et al.*, (2012), quienes reportan 3'572,328 m³ de volumen total en la UMAFOR 1008 El Salto, en todo el ciclo de corta. Para la estimación de residuos de biomasa forestal de especies de pinos se basaron en los datos del Inventario Forestal y de Suelos (2004-2009) que ha realizado la Comisión Nacional Forestal (CONAFOR) en todo el país, y en los programas de manejo forestal que se hacen de manera local para el aprovechamiento forestal, estimando 28,579 ton de biomasa seca anuales.

Son pocos los trabajos que han evaluado la cantidad óptima que debe permanecer en el suelo para mitigar la pérdida de nutrientes al realizar la cosecha forestal; en este estudio se consideró como cantidad mínima para recuperación de nutrientes el 10% del volumen total disponible de residuos, que equivale a

0.47 ton ha⁻¹, lo cual es congruente a lo estimado por Borjesson (2000), que sugiere que la cantidad mínima de residuos que se requiere para mantener la fertilidad del suelo puede variar entre 0,8 y 2.2 ton ha⁻¹ por periodo rotacional, dependiendo de las condiciones particulares de la zona.

6.5.3. Reducción Potencial de GEI

La reducción potencial de emisiones de toneladas de CO₂ equivalente (tCO₂e) emitidas a la atmósfera por el cambio en el tipo de generación de energía eléctrica, se calculó en promedio anual de 15,793 (tCO₂e) durante todo el ciclo de corta. Los resultados de las emisiones emitidas a la atmósfera se reportan por anualidad en la Tabla 10.

Tabla 10. Reducción de toneladas de tCO₂ equivalente

AÑO	Total m ³	Biomasa seca (ton)	tCO ₂ e
1	62,490	31,583	17,055
2	55,464	28,612	15,450
3	52,988	27,000	14,580
4	54,516	28,103	15,176
5	53,119	27,402	14,797
6	58,120	30,629	16,539
7	58,001	30,466	16,452
8	58,713	30,946	16,711
9	54,097	28,114	15,181
10	56,524	29,612	15,990
Total	564,033	292,466	157,931

6.5.4. Determinación de los indicadores de rentabilidad

Los resultados que proyecta la tabla de flujo de efectivo del estudio (Tabla 11), manifiestan tendencias positivas de la instalación de una planta de gasificación de residuos de biomasa forestal para la generación de bioenergía en un periodo diseñado tentativamente para 10 años, y las alternativas de comercialización de esta energía pueden ser la Comisión Federal de Electricidad, alguna empresa externa o al municipio, ya que este último es quien paga los costos del alumbrado público, (costo más alto establecido por CFE); y además contribuye al desarrollo regional, ya que esta actividad generaría 34 empleos directos para los habitantes de esta comunidad forestal. En la Tabla 11 se presentan los resultados de la tabla de flujo de efectivo.

Tabla 11. Flujo de efectivo

CONCEPTOS	AÑOS									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
INSTALACIONES	\$372,000	\$50,000	\$50,000	\$50,000	\$50,000	\$50,000	\$50,000	\$50,000	\$50,000	\$50,000
EQUIPOS (12)	\$21,600,000	\$0	\$0	\$0	\$0	\$0	\$0	\$0	\$0	\$0
ASTILLADORA	\$1,000,000	\$0	\$0	\$0	\$0	\$0	\$0	\$0	\$0	\$0
MANTENIMIENTO DE EQUIPO	\$288,000	\$288,000	\$288,000	\$288,000	\$288,000	\$288,000	\$288,000	\$288,000	\$288,000	\$288,000
RECURSOS HUMANOS										
SUPERVISOR	\$216,000	\$216,000	\$216,000	\$216,000	\$216,000	\$216,000	\$216,000	\$216,000	\$216,000	\$216,000
CONTRATISTA	\$144,000	\$144,000	\$144,000	\$144,000	\$144,000	\$144,000	\$144,000	\$144,000	\$144,000	\$144,000
ADMINISTRATIVO	\$144,000	\$144,000	\$144,000	\$144,000	\$144,000	\$144,000	\$144,000	\$144,000	\$144,000	\$144,000
SECRETARIA	\$96,000	\$96,000	\$96,000	\$96,000	\$96,000	\$96,000	\$96,000	\$96,000	\$96,000	\$96,000
OBREROS	\$720,000	\$720,000	\$720,000	\$720,000	\$720,000	\$720,000	\$720,000	\$720,000	\$720,000	\$720,000
MATERIA PRIMA (\$/m3)										
PINO	\$3,504,296	\$2,869,029	\$2,880,150	\$2,828,205	\$2,747,685	\$2,736,850	\$2,772,556	\$2,762,587	\$2,711,871	\$2,734,933
ENCINO	\$1,340,096	\$1,462,906	\$1,239,801	\$1,428,596	\$1,401,098	\$1,838,464	\$1,787,837	\$1,859,662	\$1,524,826	\$1,704,956
TRANSPORTE VARIABLE 25-75 km.	\$18,746,932	\$16,639,312	\$15,896,367	\$16,354,925	\$15,935,792	\$17,436,099	\$17,400,237	\$17,613,861	\$16,229,224	\$16,957,225
CONEXIÓN/RED										
REDIRECCIONADOR	\$2,000	\$0	\$0	\$0	\$0	\$0	\$0	\$0	\$0	\$0
TRASFORMADORES	\$105,720	\$0	\$0	\$0	\$0	\$0	\$0	\$0	\$0	\$0
TOTAL	\$48,279,043	\$22,629,247	\$21,674,317	\$22,269,726	\$21,742,575	\$23,669,413	\$23,618,630	\$23,894,110	\$22,123,921	\$23,055,114
INGRESOS										
VENTA DE BIOENERGÍA KWh	\$30,110,424	\$27,277,375	\$25,740,884	\$26,792,379	\$26,124,161	\$29,200,360	\$29,045,724	\$29,503,015	\$26,802,905	\$28,230,786
COSTOS NETOS	(\$18,168,620)	\$4,648,128	\$4,066,567	\$4,522,653	\$4,381,587	\$5,530,947	\$5,427,094	\$5,608,905	\$4,678,984	\$5,175,672

En el 2015, el costo promedio por KWh fue de \$1.55 para cada uno de los 19,200 usuarios registrados en la región de El Salto, (CFE, com. pers.), ya que el costo por KWh es variable. Esta variabilidad depende de la cantidad de energía que el usuario demande, es decir, los cargos por energía consumida se dividen en tres. El consumo básico es de \$0.809 por los primeros 75 KWh consumidos, el consumo intermedio es de \$0.976 por cada uno de los siguientes 100 KWh y el consumo excedente que es de \$2.859 por cada KWh adicional a los anteriores. Los indicadores financieros demuestran que un KWh generado con bioenergía es de \$0.60, es decir, 258% más barato que el precio promedio.

Los resultados se analizan por separado y se desarrollan con mayor detalle en los siguientes subíndices.

6.5.4.1. Valor Actual Neto o Valor Neto Presente

El valor Actual Neto o Valor Actual Presente equivalente a \$8'717,639.73 (Tabla 12), por lo que los criterios de decisión expuestos en la revisión bibliográfica, se obtuvo un valor mayor a cero, por lo tanto el estudio se considera como viable.

Tabla 12. Valor actual neto o valor neto presente

n	10	VAN	
i	10%	\$8'717,639.73	
t	FF(t)		
1	-\$18,168,620.00		
2	\$4,648,128.00		
3	\$4,066,567.00		
4	\$4,522,653.00		
5	\$4,381,587.00		
6	\$5,530,947.00		
7	\$5,427,094.00		
8	\$5,608,905.00		
9	\$4,678,984.00		
10	\$5,175,672.00		

La tasa de actualización manejada para el cálculo del VAN o VNP fue del 10%; según Sánchez (2004), argumenta que la tasa que se utiliza para descontar los

flujos deben corresponder a una tasa real, esto se hace para que exista correspondencia con los flujos calculados, ya que los flujos anuales son constantes, es decir, no incluyen inflación.

6.5.4.2. Tasa Interna de Retorno

El resultado de la TIR (Tabla 13) proyecta un resultado del 21.56%. La regla de decisión establece que si ésta es menor a la Tasa Mínima Requerida de Rendimiento, entonces el proyecto no se acepta. Para este estudio se consideró como Tasa Mínima Requerida de Rendimiento a la Tasa de actualización utilizada equivalente al 10%. Al comparar ambas se observa que la TIR es mayor, por lo tanto el estudio se considera como viable.

Tabla 13. Tasa interna de retorno

n	10
t	FF(t)
1	-\$18,168,620.00
2	\$4,648,128.00
3	\$4,066,567.00
4	\$4,522,653.00
5	\$4,381,587.00
6	\$5,530,947.00
7	\$5,427,094.00
8	\$5,608,905.00
9	\$4,678,984.00
10	\$5,175,672.00

TIR
21.56%

Estos resultados son congruentes con lo reportado en otros trabajos, por ejemplo Nickerson y colaboradores, (2015), realizaron una evaluación económica de las tecnologías de gasificación de biomasa y reportan que los valores de equilibrio para estas instalaciones se encuentran dentro de la gama observada de los precios del gas natural en la última década y algunos podrían posiblemente competir con niveles históricamente bajos.

Liu y sus colegas (2011) reportan una estimación aproximada de 54 - 108 € MWh⁻¹ en un estudio que comparó varias tecnologías de generación de energía renovable en China y su estrategia en el control de GEI en el país. Zhao y colegas

(2013), reportan una sola estimación de 79 € MWh⁻¹ en la investigación Objetivo de desarrollo de 30 GW para la generación de energía de biomasa de China, y Mang (2009), en su estudio sobre la generación de energía de biomasa en China, reporta un rango de 85 € MWh⁻¹.

6.6. CONCLUSIONES

De acuerdo a los resultados obtenidos en este estudio, 29,247 ton de biomasa seca por año pueden utilizarse como materia prima para la generación de bioenergía en los ejidos de la región de El Salto.

Consecuentemente existe potencial para generar, en promedio, 138,589 y 92,899 KWh diarios durante un año con los residuos disponibles de pino y de encino, respectivamente, es decir, 231,489 KWh por día⁻¹.

Los resultados encontrados demuestran que un KWh generado con bioenergía es de \$0.60 y el costo promedio por KWh en el 2015 (CFE, com. pers.), fue de \$1.55 para los habitantes de la región de El Salto, Durango.

6.7. LITERATURA CITADA

Bierman, H. & Smidt, S. (1997) El presupuesto de bienes de capital. México: Fondo de Cultura Económica, 1977.

Borjesson, P. (2000, September). Economic valuation of the environmental impact of logging residue recovery and nutrient compensation. *Biomass and Bioenergy*, 19, pp 16.

Campos, M. & Marcos, F. (2002). *Los Biocombustibles*. Ed. Mundi-Prensa. 348p.

Craig, K. L. & Mann, M. (1996, October). Cost and performance analysis of biomass-based integrated gasification combined-cycle (BIGCC) power systems. Golden, CO: National Renewable Energy Laboratory; p. 70. NREL/TP-430-21657.

FAO. (2008). *Forests and energy: Key issues*. FAO forestry paper 154. 56p. <ftp://ftp.fao.org/docrep/fao/010/i0139e/i0139e00.pdf>.

Kennedy, M. (2008). Assessment of Potential for Emission Reduction Credits in Durango, Mexico. The Pembina Institute. p 30.

Liu, T., Xu, G., Cai, P., Tian, L. & Huang, Q. (2011). Development forecast of renewable energy power generation in China and its influence on the GHG control strategy of the country. *Renew Energy*, 36, 9 p.

Nickerson, T. A., Hathaway, B. J., Smith, T. M. & Davison, J. H. (2015, January 4). Economic assessment of solar and conventional biomass gasification technologies: Financial and policy implications under feedstock and product gas price uncertainty. *Biomass and Bioenergy*, 74, 11 p.

Mang, H. P. (2009) Biomass power generation in China (online presentation) [Internet]. Kirchberg: *German Biogas and Bioenergy Society*; (cited 2014 Dec 8). Available from: http://www.frankhaugwitz.info/doks/bio/2009_10_China_Development_biomass_power_technology_Mang_ABRA_2009.pdf.

Perez-Verdin, G., Navar-Chaidez, J. J., Grebner, D. L. & Soto-Álvarez, C. E. (2012, Mayo 17). Disponibilidad y costos de producción de biomasa forestal como materia prima para la producción de bioetanol. *Forest systems*, 21, pp 12.

Sánchez De G. A. (2004). Evaluación de un proyecto de inversión forestal. Tesis profesional. Universidad Autónoma Chapingo. 153p.

Sapag, N. & Sapag, R. (2000). Preparación y evaluación de proyectos. Editorial Mc Graw Hill. Santiago, Chile. 439 p.

Xingang, Z., Zhongfu, T. & Pingkuo, L. (2013) Development goal of 30 GW for China's biomass power generation: will it be achieved? *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 25, 8 p.

7. CONCLUSIONES GENERALES

Los resultados encontrados indican que existe potencial para abastecer a toda la región con energía renovable, contribuir a la mitigación del cambio climático y al desarrollo regional, ya que esta actividad generaría empleos para los habitantes de las comunidades forestales.

Para la ejecución y viabilidad técnica-económica de proyectos con un enfoque hacia la generación de energía renovable a partir de residuos de biomasa forestal, es recomendable que exista un mayor interés por parte de las dependencias gubernamentales para promover e implementar las estrategias existentes en la Ley para el aprovechamiento de Energías Renovables y el Financiamiento de la Transición Energética (LAERFTE, 2008), con los propietarios de los bosques, industrias y empresas externas de las regiones con alto potencial forestal del país.

8. BIBLIOGRAFÍA

Antal, J. & Gronli, M. (2003). The Art, Science and Technology of Charcoal Production. American Chemical Society. Published on web 03/14/2003 Hawaii Natural Energy. Institute of the University of Hawaii. 22 p.

Aragón, M. E. (2009). La pirolisis, solución a los entresagues de las plantaciones. In:<http://www.agrovetindustrial.com/docs/Articulo>.

CIFOR (2009). "Oportunidades y desafíos para la producción de biocombustibles en América Latina". Boletín ambiental CIFOR. Septiembre 2009.

Chinoweth, D. P. & Fannin, K. (2002). Biological Gasification of Marine Algae, Department of Agricultural and Biological Engineering, University of Florida, October, 87-112 p.

Drigo, R. & Trossero, M. (2005). "Interactive Wood Energy Statistics i-WESTAT, Update 2004", FAO Forestry Department, Rome, 69.

EIA (2010). "International Energy Outlook 2010", EIA/DOE, Estado Unidos.

Energías Renovables (2004). Energía Biomasa Dirección Nacional de Promoción, Subsecretaría de Energía Eléctrica, Secretaría de Energía, República Argentina. <http://energia.mecon.gov.ar.pdf>. (Consultado 1 de Noviembre 2014).

Evans, A., Strezov, V. & Evans, T. J. (2010). "Sustainability considerations for electricity generation from biomass". *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 14 1419-1427.

FAO (2010). "What woodfuels can do to mitigate climate change". FAO Forestry Paper 162. Rome, Italy.

Flotats, X. (2000). La planta de biogás de mar El Cros. Evaluación de 16 años de funcionamiento. *Residuos*. 54: 54-60.

García, S. (2012) CENTRALES TERMOELÉCTRICAS DE BIOMASA. Madrid, España: RENOVETEC.

Garrués, J. A., Pérez, J. A., Bilbao, R., Canalís, P., Ciria, P., Díaz, M., Pascual, L. E., Fonts, I., García, P., García, D., Gea, G., Gil, M., Gómez, M., Llera, E., López, E., Maraver, D., Mediavilla, I., Rezeau, A., Royo, J., Sánchez, J. L. & Nogués, F. S. (2010). ENERGÍAS RENOVABLES. Energías de la biomasa (volumen 1). (1era edición). Zaragoza, España: Prensas universitarias de Zaragoza.

Hakkila, P., Heino, M. & Puranen, E. (1997). Forest management for bioenergy, Finish Forest Research Institute.

Hernández, M. H., Islas, S. J.; Manziní, P. F. & Macías, G. P. (2004). Nuevas energías renovables: Una alternativa sustentable para México.

IEA (2009). "Transport, Energy and CO₂: Moving Toward Sustainability".

International Energy Agency World Energy Outlook (2011). Available at: <http://www.iea.org/publications/freepublications/publication/name,37085,en.html>; November 2014.

IPCC (2011). "Special Report Renewable Energy Sources: Summary for Policy Makers".

Islas, J., Manzini, F. L. & Masera, O. R. (2007). "A prospective study of bioenergy use in México Energy", Volume 32, Issue, December 2007, Pages 2306-2320.

Jonhson, T. M., Alatorre, C., Romo, Z. & Liu, F. (2009). "México: estudio sobre la disminución de emisiones de carbón (MEDEC)". México, Banco Mundial-EDS. MAYOL.

Ley para el aprovechamiento de energías renovables y el financiamiento de la transición energética (2013). Available at: <http://www.diputados.gob.mx/LeyesBiblio/pdf/LAERFTE.pdf>. (Consultado 5 de Junio 2015).

Madrid, A. (2012). LA BIOMASA Y SUS APLICACIONES ENERGÉTICAS. Madrid, España: AMV ediciones.

Masera, O. R., Aguillón, J. E., Arvizu, J. L., Fuentes, A. F., Ghilardi, A., Riegelhaupt, E., Saldaña, R., Best, G., Gómez, I., Díaz, R., Camiño R. B., Berrueta, V. M., Islas, J. M., Manzini, F. & Rodríguez, O. (2006). "La bioenergía en México: un catalizador del desarrollo sustentable". Comisión Nacional Forestal.

Patiño, J. F. & Smith, Q. R. (2008). Consideraciones sobre la dendroenergía bajo un enfoque sistemático. In: Revista energética. No. 39. Universidad Nacional de Colombia. Medellín Colombia. pp. 19-36.

Schmidhube, J. (2013). Impact of an increased biomass use on agricultural markets, prices and food security: a longer-term perspective. Available at: <http://www.globalbioenergy.org/uploads/media/0704>.

Schubert, R., Shellnhuber, H. J., Buchmann, N., Epiney, A., GrieBhammer, R., Kulesa, M., Messner, D., Rahmstorf, S. & Schmid, J. (2009). Future Bioenergy and sustainable Land Use. Germany: earthscan.

Villalón, M. H. & Carrillo, P. A. 2010. Plantas productoras de leña y carbón. In: De la lechuguilla a las biopelículas vegetales las plantas útiles de Nuevo León. Universidad Autónoma de Nuevo León. Monterrey, Nuevo León, México. p. 267-280.

9. ANEXOS

Anexo I: Parámetros estimados y estadísticos de bondad de ajuste del modelo completo

Sp	Parm	θ_i	StdE	t-value	P > t	RMSE	R _a ²
1y2	a ₀	0.0000033	0.000001	2.33	0.0204	0.0358	0.809
	b ₀	2.403055	0.1413	17.01	<.0001		
	b ₁	0.039631	0.00927	4.28	<.0001		
	c ₀	0.618164	0.1128	5.48	<.0001		
1y3	a ₀	0.000005	0.000002	2.34	0.0200	0.0351	0.821
	b ₀	2.407024	0.1404	17.15	<.0001		
	b ₁	-0.09839	0.0103	-9.57	<.0001		
	c ₀	0.666746	0.1065	6.26	<.0001		
1y4	a ₀	1.174E-6	8.799E-7	1.33	0.1831	0.0355	0.791
	a ₁	02.952E-6	2.604E-6	1.13	0.2577		
	b ₀	2.995354	0.2564	11.68	<.0001		
	b ₁	-0.70754	0.3180	-2.12	0.0268		
	c ₀	0.127345	0.1899	0.67	0.5029		
	c ₁	0.665951	0.2384	2.79	0.0055		
1y5	a ₀	2.085E-6	1.915E-6	1.09	0.2772	0.0371	0.791
	a ₁	2.041E-6	3.199E-6	0.64	0.5239		
	b ₀	2.20243	0.3280	6.71	<.0001		
	b ₁	0.085384	0.3824	0.22	0.8235		
	c ₀	1.208713	0.2755	4.39	<.0001		
	c ₁	-0.41541	0.3140	-1.32	0.1869		
1y6	a ₀	8.119E-6	3.266E-6	2.49	<.0001	0.0339	0.796
	b ₀	2.222463	0.1313	16.92	<.0001		
	c ₀	0.557204	0.1213	4.59	<.0001		
	c ₁	0.049274	0.0230	2.14	0.0327		
1y7	a ₀	3.994E-6	1.949E-6	2.05	0.0414	0.0372	0.797
	b ₀	2.598985	0.1531	16.98	<.0001		
	b ₁	-0.16953	0.0169	-10.01	<.0001		
	c ₀	0.559464	0.1121	4.99	<.0001		
1y8	a ₀	5.199E-6	2.697E-6	1.93	0.05	0.0340	0.809
	b ₀	2.180283	0.1723	12.66	<.0001		
	b ₁	0.057059	0.0232	2.46	0.0145		
	c ₀	0.778579	0.1349	5.77	<.0001		
1y9	a ₀	6.857E-6	3.377E-6	2.03	0.0431	0.0378	0.761
	a ₁	-1.48E-6	6.388E-7	-2.32	0.0210		
	b ₀	2.413381	0.1616	14.94	<.0001		
	c ₀	0.453528	0.1127	4.02	<.0001		
1y10	a ₀	3.25E-6	1.471E-6	2.21	<.0001	0.0307	0.812
	b ₀	2.467047	0.1500	16.44	<.0001		
	b ₁	-0.05745	0.0156	-3.67	<.0001		
	c ₀	0.686526	0.1025	6.70	<.0001		
1y11	a ₀	5.742E-6	2.544E-6	2.26	0.0247	0.0355	0.798
	b ₀	2.381948	0.1432	16.63	<.0001		
	b ₁	-0.04537	0.0120	-3.79	.0002		
	c ₀	0.559954	0.1093	5.12	<.0001		
1y13	a ₀	0.000016	0.000027	0.57	0.5672	0.0356	0.798
	a ₁	-0.00001	0.000027	-0.42	0.6750		
	b ₀	2.101045	0.6151	3.42	0.0007		

Factibilidad del uso de los residuos del aprovechamiento forestal para propósitos bioenergéticos en la región de El Salto, Durango

Sp	Parm	θ_i	StdE	t-value	P > t	RMSE	R_a^2
	b ₁	0.186767	0.6435	0.29	0.7719		
	c ₀	0.499822	0.4382	1.14	0.2551		
	c ₁	0.293474	0.4615	0.64	0.5254		
2y3	a ₀	4.81E-6	1.596E-6	3.01	0.0028	0.0274	0.863
	a ₁	-2.01E-6	6.267E-6	-3.21	0.0015		
	b ₀	2.550115	0.1158	22.02	<.0001		
	c ₀	0.432234	0.0924	4.68	<.0001		
2y4	a ₀	1.625E-6	6.17E-6	2.63	0.0088	0.0280	0.827
	b ₀	2.852041	0.1329	21.46	<.0001		
	b ₁	-0.05259	0.00970	-5.42	<.0001		
	c ₀	0.231309	0.1021	2.27	0.0240		
2y5	a ₀	2.097E-6	8.833E-7	2.37	0.0182	0.0293	0.827
	b ₀	2.200683	0.1784	12.33	<.0001		
	b ₁	0.475017	0.1398	3.40	0.0008		
	c ₀	1.20925	0.2087	5.79	<.0001		
	c ₁	-0.87102	0.2448	-3.56	0.0004		
2y6	a ₀	0.000019	8.116E-6	2.33	0.0205	0.0257	0.842
	a ₁	-0.00002	8.132E-6	-2.10	0.0361		
	b ₀	2.18078	0.1283	17.00	<.0001		
	b ₁	0.598139	0.1570	3.81	0.0002		
	c ₀	0.226539	0.0962	2.36	0.0190		
2y7	a ₀	5.094E-6	1.745E-6	2.92	0.0038	0.0278	0.846
	a ₁	-2.83E-6	9.103E-7	-3.11	0.0020		
	b ₀	2.689785	0.1128	23.84	<.0001		
	c ₀	0.278017	0.0906	2.07	0.0024		
2y8	a ₀	0.000016	0.000014	1.10	0.2721	0.0243	0.860
	a ₁	-0.00001	0.000014	-0.95	0.3425		
	b ₀	2.078359	0.3860	5.38	<.0001		
	b ₁	0.596664	0.4141	1.44	0.1507		
	c ₀	0.415834	0.4442	0.94	0.3500		
	c ₁	-0.07731	0.4608	-0.17	0.8669		
2y9	a ₀	3.622E-6	1.553E-6	2.33	0.0203	0.0303	0.796
	b ₀	2.67965	0.1428	17.77	<.0001		
	c ₀	0.279368	0.1004	2.78	0.0057		
	c ₁	-0.19817	0.0228	-8.70	<.0001		
2y10	a ₀	1.954E-6	6.955E-6	2.81	0.0052	0.0232	0.855
	b ₀	2.708208	0.1200	22.56	<.0001		
	c ₀	0.511078	0.0860	5.94	<.0001		
	c ₁	-0.19908	0.0227	-8.77	<.0001		
2y11	a ₀	4.083E-6	1.374E-6	2.97	0.0032	0.0270	0.845
	b ₀	2.607509	0.1139	22.88	<.0001		
	b ₁	-0.08924	0.00941	-9.48	<.0001		
	c ₀	0.317323	0.0915	3.47	0.0006		
2y13	a ₀	2.626E-6	1.11E-6	2.37	0.0187	0.0255	0.849
	b ₀	2.675419	0.1571	17.03	<.0001		
	b ₁	-0.07211	0.0224	-3.21	0.0015		
	c ₀	0.365904	0.1196	3.06	0.0024		
3y4	a ₀	3.105E-6	1.121E-6	2.77	0.0059	0.0267	0.849
	b ₀	2.671806	0.1205	22.17	<.0001		
	c ₀	0.248315	0.0910	2.73	0.0067		
	c ₁	0.174834	0.0154	11.32	<.0001		
3y5	a ₀	1.394E-6	6.496E-7	2.15	0.0327	0.0278	0.850
	a ₁	0.000006	2.847E-7	2.18	0.0302		

Factibilidad del uso de los residuos del aprovechamiento forestal para propósitos bioenergéticos en la región de El Salto, Durango

Sp	Parm	θ_i	StdE	t-value	P > t	RMSE	R_a^2
	b ₀	2.367297	0.1366	17.33	<.0001		
	c ₀	1.103044	0.1621	6.81	<.0001		
	c ₁	-0.56103	0.1715	-3.27	0.0012		
3y6	a ₀	0.00001	3.064E-6	3.40	0.0007	0.0241	0.866
	b ₀	2.260883	0.0974	23.22	<.0001		
	b ₁	0.117563	0.00892	13.18	<.0001		
	c ₀	0.368354	0.0864	4.26	<.0001		
3y7	a ₀	5.697E-6	1.982E-6	2.87	0.0044	0.0006	0.870
	b ₀	2.612551	0.1086	24.05	<.0001		
	b ₁	-0.06838	0.0100	-6.83	<.0001		
	c ₀	0.360962	0.0821	4.39	<.0001		
3y8	a ₀	7.426E-6	2.565E-6	2.89	0.0041	0.0215	0.896
	b ₀	2.232383	0.1174	19.02	<.0001		
	b ₁	0.161756	0.0141	11.51	<.0001		
	c ₀	0.504573	0.0949	5.32	<.0001		
3y9	a ₀	7.906E-6	3.18E-6	2.49	0.0134	0.0286	0.822
	b ₀	2.486893	0.1315	18.92	<.0001		
	c ₀	0.245435	0.0915	2.68	0.0077		
	c ₁	0.061652	0.0177	3.48	0.0066		
3y10	a ₀	4.331E-6	1.409E-6	3.07	0.0023	0.0213	0.884
	b ₀	2.497834	0.1092	22.87	<.0001		
	b ₁	0.047116	0.00914	5.16	<.0001		
	c ₀	0.49199	0.0768	6.40	<.0001		
3y11	a ₀	7.448E-6	2.374E-6	3.14	0.0019	0.0249	0.870
	b ₁	2.434827	0.1040	23.40	<.0001		
	c ₀	0.339695	0.0817	4.16	<.0001		
	c ₁	0.090254	0.0143	6.32	<.0001		
3y13	a ₀	6.895E-6	2.623E-6	2.63	0.0091	0.0228	0.886
	b ₀	2.329837	0.1323	17.61	<.0001		
	b ₁	0.084636	0.0183	4.64	<.0001		
	c ₀	0.503577	0.0972	5.18	<.0001		
4y5	a ₀	1.513E-6	6.934E-6	2.18	0.0298	0.0285	0.792
	b ₀	2.302738	0.1853	12.43	<.0001		
	b ₁	0.613315	0.1390	4.41	<.0001		
	c ₀	1.178169	0.2044	5.77	<.0001		
	c ₁	-1.02806	0.2432	-4.23	<.0001		
4y6	a ₀	5.829E-6	1.955E-6	3.00	0.0029	0.0252	0.795
	a ₁	6.573E-7	2.956E-7	2.22	0.0268		
	b ₀	2.5052	0.1105	22.68	<.0001		
	c ₀	0.192669	0.0938	2.05	0.0407		
4y7	a ₀	4.113E-6	1.55E-6	2.65	0.0084	0.0267	0.815
	a ₁	-1.93E-6	7.004E-7	-2.76	0.0061		
	b ₀	2.791477	0.1175	23.76	<.0001		
	c ₀	0.200895	0.0882	2.28	0.0236		
4y8	a ₀	0.000016	0.000013	1.17	0.2411	0.0227	0.813
	a ₁	-0.00001	0.000013	-1.09	0.2785		
	b ₀	2.078366	0.3615	5.75	<.0001		
	b ₁	0.917057	0.3972	2.31	0.0217		
	c ₀	0.415871	0.4160	1.00	0.3184		
	c ₁	-0.28854	0.4335	-0.67	<.0001		
4y9	a ₀	3.232E-6	1.501E-6	2.15	0.0321	0.0294	0.753
	b ₀	2.77869	0.1529	18.17	<.0001		
	c ₀	0.155966	0.1013	1.54	0.1247		

Factibilidad del uso de los residuos del aprovechamiento forestal para propósitos bioenergéticos en la región de El Salto, Durango

Sp	Parm	θ_i	StdE	t-value	P > t	RMSE	R_a^2
4y10	c ₁	-0.11729	0.0211	-5.57	<.0001	0.0222	0.815
	a ₀	1.47E-6	5.57E-7	2.64	0.0086		
	b ₀	2.919113	0.1282	22.78	<.0001		
	b ₁	-0.06633	0.0110	-6.04	<.0001		
4y11	c ₀	0.276826	0.0871	3.18	0.0016	0.0260	0.816
	a ₀	9.915E-6	1.376E-6	2.84	0.0047		
	b ₀	2.66625	0.1148	23.23	<.0001		
	b ₁	-0.04578	0.00946	-4.84	<.0001		
4y13	c ₀	0.23097	0.0888	2.60	0.0097	0.0240	0.795
	a ₀	0.000016	0.000018	0.85	0.3963		
	a ₁	-0.00001	0.000018	-0.79	0.4330		
	b ₀	2.100954	0.4148	5.06	<.0001		
	b ₁	0.894315	0.4497	1.99	0.0478		
5y6	c ₀	0.499917	0.2955	1.69	0.0919	0.0256	0.794
	c ₁	-0.37271	0.3223	-1.16	0.2486		
	a ₀	0.000021	9.533E-6	2.21	0.0276		
	a ₁	-0.00002	9.54E-6	-2.11	0.0354		
	b ₀	1.989688	0.100	14.22	<.0001		
5y7	b ₁	0.805503	0.2052	3.92	<.0001	0.0293	0.801
	c ₀	0.529786	0.1224	4.33	0.4306		
	a ₀	2.364E-6	1.117E-6	2.12	0.0353		
	b ₀	2.743249	0.1470	18.66	<.0001		
5y8	b ₁	-0.20324	0.0144	-14.14	<.0001	0.0242	0.810
	c ₀	0.559941	0.1087	5.15	<.0001		
	a ₀	0.000016	0.000014	1.10	0.2705		
	a ₁	-0.00001	0.000014	-0.95	0.3411		
	b ₀	2.078547	0.3845	5.41	<.0001		
5y9	b ₁	0.123674	0.4401	0.28	0.7789	0.0305	0.758
	c ₀	0.415662	0.4425	0.94	0.3485		
	c ₁	0.793517	0.4776	1.66	0.0979		
	a ₀	5.258E-6	2.721E-6	1.93	0.05		
	b ₀	1.910994	0.2062	9.27	<.0001		
5y10	b ₁	0.812333	0.1423	5.71	<.0001	0.0231	0.814
	c ₀	1.299219	0.2196	5.92	<.0001		
	c ₁	-1.28329	0.2518	-5.10	<.0001		
	a ₀	1.897E-6	8.457E-6	2.24	0.0255		
	b ₀	2.732957	0.1531	17.85	<.0001		
5y11	b ₁	-0.50135	0.1208	-4.15	0.0039	0.0282	0.805
	c ₀	0.482206	0.1357	3.55	0.0004		
	c ₁	0.71833	0.2121	3.39	0.0008		
	a ₀	4.279E-6	1.802E-6	2.37	0.0183		
5y13	b ₀	2466534	0.1391	17.73	<.0001	0.0259	0.788
	b ₁	-0.0742	0.1391	-6.90	<.0001		
	c ₀	0.548252	0.0108	5.06	<.0001		
	a ₀	3.17E-6	1.725E-6	1.84	0.06		
6y7	a ₁	-6.59E-7	3.375E-7	-1.95	0.05	0.0234	0.833
	b ₀	2.269824	0.2006	11.31	<.0001		
	c ₀	1.007399	0.1608	6.26	<.0001		
	a ₀	0.000012	3.684E-6	3.26	0.0013		
6y8	b ₀	2.437418	0.0922	26.44	<.0001	0.0187	0.833
	c ₀	0.302369	0.0766	3.95	<.0001		
	c ₁	-0.33648	0.0212	-15.91	<.0001		
	a ₀	0.000014	4.053E-6	3.57	0.0004		

Factibilidad del uso de los residuos del aprovechamiento forestal para propósitos bioenergéticos en la región de El Salto, Durango

Sp	Parm	θ_i	StdE	t-value	P > t	RMSE	R_a^2
	a ₁	3.013E-6	1.222E-6	2.46	0.0143		
	b ₀	2.25249	0.0971	23.19	<.0001		
	c ₀	0.129509	0.0951	1.36	0.1743		
6y9	a ₀	0.00002	7.176E-6	2.82	0.0050	0.0261	0.777
	b ₀	2.707962	0.1359	19.93	<.0001		
	c ₀	-0.42903	0.1559	-2.75	0.0062		
	c ₁	-0.10913	0.0140	-7.79	<.0001		
6y10	a ₀	9.807E-6	2.781E-6	3.53	0.0005	0.0195	0.826
	b ₀	2.237926	0.1085	20.63	<.0001		
	b ₁	0.193432	0.0838	2.31	0.0214		
	c ₀	0.548223	0.1137	4.82	<.0001		
	c ₁	-0.47117	0.1513	-3.11	0.0020		
6y11	a ₀	0.000013	3.759E-6	3.54	0.0005	0.0226	0.841
	b ₀	2.326088	0.0922	25.24	<.0001		
	c ₀	0.256868	0.0788	3.26	0.0012		
	c ₁	-0.13196	0.0171	-7.72	<.0001		
6y13	a ₀	0.000016	0.000015	1.03	0.3061	0.0199	0.812
	a ₁	2.152E-6	0.00016	0.13	0.8953		
	b ₀	2.100955	0.3437	6.11	<.0001		
	b ₁	0.159221	0.3609	0.44	0.6594		
	c ₀	0.499917	0.2449	2.04	0.0422		
	c ₁	-0.39326	0.2661	-1.48	0.1406		
7y8	a ₀	7.643E-6	2.884E-6	2.65	0.0087	0.0202	0.860
	b ₀	2.606079	0.1081	24.11	<.0001		
	c ₀	-0.22097	0.0970	-2.16	0.0318		
	c ₁	0.435354	0.0269	16.18	<.0001		
7y9	a ₀	0.000012	8.088E-6	1.50	0.1338	0.0290	0.778
	a ₁	-4.71E-6	9.369E-6	-0.50	0.6156		
	b ₀	2.466817	0.2148	11.48	<.0001		
	b ₁	0.16653	0.2752	0.61	0.5456		
	c ₀	0.068157	0.1314	0.52	0.6045		
	c ₁	0.121104	0.1896	0.64	0.5235		
7y10	a ₀	2.239E-6	8.305E-6	2.70	0.0074	0.0203	0.850
	a ₁	4.318E-6	2.065E-6	2.09	0.0373		
	b ₀	2.672471	0.1029	25.98	<.0001		
	c ₀	0.507382	0.1085	4.68	<.0001		
	c ₁	-0.32469	0.1412	-2.30	0.0221		
7y11	a ₀	6.921E-6	2.381E-6	2.91	0.0040	0.0247	0.848
	a ₁	3.586E-6	1.143E-6	3.14	0.0019		
	b ₀	2.524499	0.1001	25.23	<.0001		
	c ₀	0.213712	0.0808	2.65	0.0087		
7y13	a ₀	4.84E-6	2.041E-6	2.37	0.0187	0.0219	0.842
	a ₁	3.574E-6	1.608E-6	2.22	0.0274		
	b ₀	2.585305	0.1210	21.36	<.0001		
	c ₀	0.215411	0.0947	2.27	0.0241		
8y9	a ₀	0.000012	5.857E-6	2.02	0.0439	0.0251	0.766
	b ₀	2.456578	0.633	15.04	<.0001		
	c ₀	-0.15161	0.1165	-1.30	0.1941		
	c ₁	0.251281	0.0321	7.82	<.0001		
8y10	a ₀	4.592E-6	1.679E-6	2.74	0.0066	0.0158	0.843
	a ₁	-1.57E-6	5.459E-6	-2.88	0.0043		
	b ₀	2.485468	0.1224	20.30	<.0001		
	c ₀	0.484175	0.0897	5.40	<.0001		

Factibilidad del uso de los residuos del aprovechamiento forestal para propósitos bioenergéticos en la región de El Salto, Durango

Sp	Parm	θ_i	StdE	t-value	P > t	RMSE	R_a^2
8y11	a ₀	0.000011	3.634E-6	3.05	0.0026	0.0196	0.869
	a ₁	-3.89E-6	1.349E-6	-2.89	0.0042		
	b ₀	2.365973	0.1081	21.89	<.0001		
	c ₀	0.273291	0.0903	3.03	0.0027		
8y13	a ₀	0.000019	7.31E-6	2.54	0.0119	0.0137	0.810
	a ₁	-3.91E-6	1.488E-6	-2.63	0.0092		
	b ₀	2.062276	0.1504	13.71	<.0001		
	c ₀	0.480051	0.1378	3.48	0.0006		
9y10	a ₀	0.000015	8.325E-6	1.86	0.0642	0.0240	0.779
	a ₁	-0.00001	8.353E-6	-1.69	0.0915		
	b ₀	2.317886	0.1653	14.02	<.0001		
	b ₁	0.660988	0.2460	2.69	0.0075		
	c ₀	0.223076	0.0863	2.59	0.0101		
9y11	a ₀	9.392E-6	4.833E-6	1.94	0.0529	0.0278	0.785
	a ₁	2.766E-6	9.138E-6	0.30	0.7623		
	b ₀	2.415627	0.1647	14.66	<.0001		
	b ₁	0.051257	0.2638	0.19	0.8461		
	c ₀	0.263285	0.1313	2.01	0.0458		
	c ₁	-0.19509	0.1820	-1.07	0.2847		
9y13	a ₀	0.000016	0.000020	0.77	0.4430	0.0266	0.743
	a ₁	-3.46E-6	0.000022	-0.16	0.8730		
	b ₀	2.100955	0.4586	4.58	<.0001		
	b ₁	0.366075	0.4991	0.73	0.4640		
	c ₀	0.499917	0.3267	1.53	0.1273		
	c ₁	-0.43173	0.3482	-1.24	0.2163		
10y11	a ₀	7.107E-6	2.308E-6	3.08	0.0022	0.0200	0.856
	a ₁	-3.52E-6	1.673E-6	-2.11	0.0359		
	b ₀	2.15411	0.0992	25.34	<.0001		
	c ₀	0.219711	0.0895	2.46	0.0145		
	c ₁	0.335897	0.1279	2.63	0.0090		
10y13	a ₀	2.951E-6	1.268E-6	2.33	0.0206	0.0166	0.824
	b ₀	2.6077	0.1394	18.70	<.0001		
	c ₀	0.429961	0.0943	4.56	<.0001		
	c ₁	0.05654	0.0249	2.27	0.0237		
11y13	a ₀	9.674E-6	3.526E-6	2.74	0.0066	0.0210	0.852
	b ₀	2.386528	0.1188	20.09	<.0001		
	c ₀	0.223703	0.0975	2.29	0.0227		
	c ₁	0.07771	0.0321	2.42	0.0161		
170Y172	a ₀	0.000137	0.000053	2.58	0.0104	0.0008	0.850
	a ₁	-0.00014	0.000053	-2.54	0.0117		
	b ₀	1.520662	0.1226	12.40	<.0001		
	b ₁	1.07395	0.1630	6.6	<.0001		
	c ₀	0.73851	0.0972	7.6	<.0001		

Sp= especies, Parm= Parámetro del modelo, θ_i = Estimador del parámetro, StdE= Error estándar, t-Value= Valor de probabilidad de la distribución *t* de student, P > | t | probabilidad calculada, RMSE= Raíz del Error Medio Cuadrático y R_a^2 = Coeficiente de determinación ajustado.

Anexo II: Parámetros estimados y estadísticos de bondad de ajuste del modelo reducido

Sp	Parm	θ_i	StdE	t-value	P > t	RMSE	R_a^2
1y2	a ₀	0.00000406	0.000001	2.31	0.0212	0.0367	0.800
	b ₀	2.328465	0.1436	16.21	<.0001		
	c ₀	0.694171	0.1156	6.01	<.0001		
1y3	a ₀	0.000024	0.000009	2.48	0.0137	0.0396	0.773
	b ₀	1.950462	0.1408	13.85	<.0001		
	c ₀	0.646522	0.1189	5.44	<.0001		
1y4	a ₀	0.000002	0.000001	2.27	0.0236	0.0358	0.787
	b ₀	2.531023	0.1434	17.65	<.0001		
	c ₀	0.522679	0.1118	4.67	<.0001		
1y5	a ₀	0.000002	0.000001	1.95	0.05	0.0373	0.789
	b ₀	2.350397	0.1685	13.95	<.0001		
	c ₀	0.891439	0.1323	6.74	<.0001		
1y6	a ₀	7.422E-6	2.953E-6	2.51	0.0124	0.0341	0.793
	b ₀	2.204905	0.1310	16.84	<.0001		
	c ₀	0.665882	0.1120	5.95	<.0001		
1y7	a ₀	0.000066	0.000028	2.41	0.0166	0.0398	0.768
	b ₀	2.789791	0.1219	22.88	<.0001		
	c ₀	-0.9529	0.1219	-7.82	<.0001		
1y8	a ₀	3.543E-6	1.802E-6	1.97	0.0503	0.0344	0.805
	b ₀	2.29608	0.1694	13.56	<.0001		
	c ₀	0.837345	0.1368	6.12	<.0001		
1y9	a ₀	0.000016	6.881E-6	2.32	0.0212	0.0389	0.747
	b ₀	2.132921	0.1475	14.46	<.0001		
	c ₀	0.478354	0.1187	4.03	<.0001		
1y10	a ₀	8.889E-6	3.007E-6	2.96	0.0033	0.0312	0.806
	b ₀	2.126674	0.1151	18.48	<.0001		
	c ₀	0.743228	0.1043	7.12	<.0001		
1y11	a ₀	0.00001	4.301E-6	2.42	0.0163	0.0362	0.790
	b ₀	2.188175	0.1381	15.85	<.0001		
	c ₀	0.572846	0.1136	5.04	<.0001		
1y13	a ₀	5.605E-6	2.803E-6	2.00	0.0466	0.0355	0.799
	b ₀	2.227561	0.1663	13.39	<.0001		
	c ₀	0.763729	0.1373	5.56	<.0001		
2y3	a ₀	0.000038	0.000014	2.76	0.0061	0.0362	0.761
	b ₀	1.792638	0.1340	13.37	<.0001		
	c ₀	0.661048	0.1245	5.31	<.0001		
2y4	a ₀	3.688E-6	1.306E-6	2.82	0.0050	0.0290	0.815
	b ₀	2.544611	0.1234	20.63	<.0001		
	c ₀	0.33945	0.1044	3.250	0.0013		
2y5	a ₀	2.765E-6	1.117E-6	2.48	0.0138	0.0298	0.821
	b ₀	2.433896	0.1408	17.28	<.0001		
	c ₀	0.655522	0.1183	5.54	<.0001		
2y6	a ₀	6.063E-6	1.906E-6	3.18	0.0016	0.0262	0.837
	b ₀	2.444231	0.1099	22.25	<.0001		
	c ₀	0.274229	0.0974	2.82	0.0051		
2y7	a ₀	0.000045	0.000017	2.60	0.0099	0.7342	0.732
	b ₀	1.737687	0.1395	12.46	<.0001		

Factibilidad del uso de los residuos del aprovechamiento forestal para propósitos bioenergéticos en la región de El Salto, Durango

Sp	Parm	θ_i	StdE	t-value	P > t	RMSE	R _a ²
	c ₀	0.6550558	0.1404	4.66	<.0001		
2y8	a ₀	2.553E-6	9.561E-6	2.67	0.0080	0.0244	0.859
	b ₀	2.610795	0.1364	19.15	<.0001		
	c ₀	0.362278	0.1191	3.04	0.0026		
2y9	a ₀	0.000021	7.68E-6	2.70	0.0072	0.0332	0.755
	b ₀	2.118597	0.1338	15.84	<.0001		
	c ₀	0.323834	0.1171	2.76	0.0060		
2y10	a ₀	0.000013	3.643E-6	3.70	0.0002	0.0252	0.829
	b ₀	2.060161	0.0974	21.15	<.0001		
	c ₀	0.614881	0.0959	6.41	<.0001		
2y11	a ₀	0.000013	4.586E-6	2.92	0.0037	0.0301	0.807
	b ₀	2.168596	0.1213	17.87	<.0001		
	c ₀	0.437163	0.1084	4.03	<.0001		
2y13	a ₀	4.533E-6	1.721E-6	2.63	0.0089	0.0259	0.845
	b ₀	2.445397	0.1375	17.78	<.0001		
	c ₀	0.405741	0.1214	3.34	0.009		
3y4	a ₀	4.603E-6	1.871E-6	2.46	0.0144	0.0316	0.788
	b ₀	2.602375	0.1380	18.86	<.0001		
	c ₀	0.275249	0.1043	2.64	0.0087		
3y5	a ₀	0.000014	6.597E-6	2.13	0.0343	0.358	0.752
	b ₀	2.061872	0.1679	0.1679	<.0001		
	c ₀	0.691413	0.1365	0.1365	<.0001		
3y6	a ₀	0.000026	8.674E-6	3.05	0.0025	0.0302	0.790
	b ₀	1.940977	0.1114	17.42	<.0001		
	c ₀	0.624355	0.1087	5.74	<.0001		
3y7	a ₀	0.000012	4.1E-6	2.87	0.0045	0.0278	0.852
	b ₀	2.322849	0.1114	20.85	<.0001		
	c ₀	0.434309	0.0930	4.67	<.0001		
3y8	a ₀	7.851E-6	3.477E-6	2.26	0.0247	0.0286	0.817
	b ₀	2.207029	0.1530	14.43	<.0001		
	c ₀	0.761836	0.1327	5.74	<.0001		
3y9	a ₀	6.071E-6	2.479E-6	2.45	0.0148	0.0291	0.816
	b ₀	2.568841	0.1329	19.33	<.0001		
	c ₀	0.264851	0.0908	2.92	0.0038		
3y10	a ₀	1.843E-6	5.747E-7	3.21	0.0015	0.0220	0.876
	b ₀	2.807408	0.0994	28.25	<.0001		
	c ₀	0.410444	0.0768	5.34	<.0001		
3y11	a ₀	7.953E-6	2.649E-6	3.00	0.0029	0.0265	0.854
	b ₀	2.428942	0.1084	22.40	<.0001		
	c ₀	0.370685	0.0849	4.37	<.0001		
3y13	a ₀	3.332E-6	1.275E-6	2.61	0.0095	0.0240	0.874
	b ₀	2.613168	0.1284	20.35	<.0001		
	c ₀	0.482858	0.1012	4.77	<.0001		
4y5	a ₀	1.676E-6	7.848E-7	2.14	0.0335	0.0295	0.776
	b ₀	2.685004	0.1591	16.87	<.0001		
	c ₀	0.485903	0.1206	4.03	<.0001		
4y6	a ₀	7.636E-6	2.453E-6	3.11	0.0020	0.0254	0.791
	b ₀	2.418599	0.1062	22.77	<.0001		
	c ₀	0.252051	0.0922	2.73	0.0066		
4y7	a ₀	0.000015	6.684E-6	2.19	0.0292	0.0344	0.6946

Factibilidad del uso de los residuos del aprovechamiento forestal para propósitos bioenergéticos en la región de El Salto, Durango

Sp	Parm	θ_i	StdE	t-value	P > t	RMSE	R_a^2
4y8	b ₀	2.273598	0.1528	14.88	<.0001	0.0238	0.796
	c ₀	0.288452	0.1241	2.32	0.0208		
	a ₀	1.988E-6	8.729E-7	2.28	0.0235		
4y9	b ₀	2.773133	0.1534	18.07	<.0001	0.0307	0.731
	c ₀	0.253125	0.1221	2.07	0.0391		
	a ₀	5.834E-6	2.609E-6	2.24	0.0260		
4y10	b ₀	2.613647	0.1517	17.22	<.0001	0.0231	0.799
	c ₀	0.096446	0.1070	0.90	0.3680		
	a ₀	4.424E-6	1.449E-6	3.05	0.0024		
4y11	b ₀	2.540829	0.1116	22.77	<.0001	0.0269	0.8036
	c ₀	0.34363	0.0887	3.87	<.0001		
	a ₀	4.039E-6	1.477E-6	2.74	0.0066		
4y13	b ₀	2.644393	0.1207	21.92	<.0001	0.0242	0.794
	c ₀	0.20943	0.0929	2.25	0.0249		
	a ₀	0.000002	0.000009	2.30	0.0221		
5y6	b ₀	2.798942	0.1520	18.42	<.0001	0.0271	0.782
	c ₀	0.190213	0.1171	1.62	0.1056		
	a ₀	6.979E-6	2.662E-6	2.62	0.0092		
5y7	b ₀	2.228131	0.1299	17.15	<.0001	0.0378	0.669
	c ₀	0.617773	0.1173	5.27	<.0001		
	a ₀	0.00004	0.000020	2.00	0.0460		
5y8	b ₀	1.618688	0.1806	8.96	<.0001	0.0245	0.805
	c ₀	0.940486	0.1730	5.44	<.0001		
	a ₀	3.409E-6	1.701E-6	2.00	0.0462		
5y9	b ₀	-0.20324	0.1841	11.39	<.0001	0.0343	0.695
	c ₀	0.559941	0.1609	7.24	<.0001		
	a ₀	0.000014	7.225E-6	1.97	0.0498		
5y10	b ₀	2.16453	0.1774	12.20	<.0001	0.0249	0.783
	c ₀	0.451392	0.1326	3.40	0.0008		
	a ₀	9.752E-6	3.474E-6	2.81	0.0053		
5y11	b ₀	1.981072	0.1270	15.60	<.0001	0.0304	0.7735
	c ₀	0.928336	0.1137	8.16	<.0001		
	a ₀	7.496E-6	3.357E-6	2.23	0.0263		
5y13	b ₀	2.258631	0.1538	14.69	<.0001	0.0262	0.783
	c ₀	0.58036	0.1224	4.74	<.0001		
	a ₀	4.937e-6	2.53e-6	1.95	0.052		
6y7	b ₀	2.077826	0.1884	11.03	<.0001	0.0314	0.701
	c ₀	1.045	0.1647	6.35	<.0001		
	a ₀	0.000061	0.000022	2.80	0.0055		
6y8	b ₀	1.800224	0.1177	15.29	<.0001	0.0192	0.824
	c ₀	0.440408	0.1275	3.46	0.0006		
	a ₀	0.000013	3.843E-6	3.43	0.0007		
6y9	b ₀	2.330352	0.0997	23.38	<.0001	0.0284	0.734
	c ₀	0.100852	0.0991	1.02	0.3099		
	a ₀	0.000033	0.000011	2.96	0.0033		
6y10	b ₀	2.081791	0.1128	18.45	<.0001	0.0206	0.806
	c ₀	0.193176	0.0986	1.96	0.0509		
	a ₀	0.000022	5.42E-6	3.99	<.0001		
6y10	b ₀	2.046059	0.0827	24.74	<.0001		
	c ₀	0.44419	0.0845	5.26	<.0001		
	a ₀						

Factibilidad del uso de los residuos del aprovechamiento forestal para propósitos bioenergéticos en la región de El Salto, Durango

Sp	Parm	θ_i	StdE	t-value	P > t	RMSE	R_a^2
6y11	a ₀	0.000021	6.12E-6	3.39	0.0008	0.0247	0.811
	b ₀	2.133733	0.0977	21.83	<.0001		
	c ₀	0.328839	0.0909	3.62	0.0003		
6y13	a ₀	0.000019	5.473E-6	3.45	0.0007	0.0199	0.812
	b ₀	2.207211	0.0993	22.22	<.0001		
	c ₀	0.179616	0.0982	1.83	0.0686		
7y8	a ₀	0.000042	0.000022	1.87	0.0629	0.0321	0.649
	b ₀	1.703654	0.1749	9.74	<.0001		
	c ₀	0.826012	0.1863	4.43	<.0001		
7y9	a ₀	0.000018	8.638E-6	2.08	0.0382	0.0319	0.730
	b ₀	2.330145	0.1491	15.63	<.0001		
	c ₀	0.178215	0.1031	1.73	0.0850		
7y10	a ₀	2.239E-6	1.05E-6	2.13	0.0336	0.0247	0.778
	b ₀	2.831968	0.1395	20.31	<.0001		
	c ₀	0.302765	0.0931	3.25	0.0013		
7y11	a ₀	0.000023	8.749E-6	2.63	0.0090	0.0294	0.785
	b ₀	2.188704	0.1211	18.08	<.0001		
	c ₀	0.290915	0.1029	2.83	0.0051		
7y13	a ₀	3.621E-6	2.012E-6	1.80	0.0734	0.0271	0.757
	b ₀	2.693839	0.1649	16.34	<.0001		
	c ₀	0.363188	0.1217	2.99	0.0032		
8y9	a ₀	0.000019	9.821E-6	1.91	0.0572	0.0287	0.696
	b ₀	2.251901	0.1787	12.60	<.0001		
	c ₀	0.176452	0.1369	1.29	0.1986		
8y10	a ₀	0.000016	5.538E-6	2.80	0.0054	0.0180	0.796
	b ₀	1.945472	0.1190	16.35	<.0001		
	c ₀	0.782977	0.1012	7.74	<.0001		
8y11	a ₀	9.135E-6	3.595E-6	2.54	0.0117	0.0223	0.815
	b ₀	2.319364	0.1327	17.48	<.0001		
	c ₀	0.400264	0.1146	3.49	0.0006		
8y13	a ₀	0.000003	0.000011	2.63	0.0093	0.0144	0.791
	b ₀	1.837399	0.1465	12.55	<.0001		
	c ₀	0.574377	0.1490	3.86	0.0002		
9y10	a ₀	4.698E-6	2.006E-6	2.34	0.0197	0.0243	0.774
	b ₀	2.655481	0.1357	19.56	<.0001		
	c ₀	0.186122	0.0857	2.17	0.0304		
9y11	a ₀	0.000012	4.516E-6	2.58	0.0104	0.0278	0.784
	b ₀	2.420499	0.1257	19.25	<.0001		
	c ₀	0.161674	0.0903	1.79	0.0743		
9y13	a ₀	7.505E-6	4.119E-6	1.82	0.0697	0.0270	0.734
	b ₀	2.568	0.1801	14.26	<.0001		
	c ₀	0.107625	0.1154	0.93	0.3521		
10y11	a ₀	5.738E-6	1.633E-6	3.51	0.0005	0.0201	0.854
	b ₀	2.499853	0.0911	27.43	<.0001		
	c ₀	0.348704	0.0735	4.74	<.0001		
10y13	a ₀	2.866E-6	1.236E-6	2.32	0.2011	0.0168	0.822
	b ₀	2.600237	0.1402	18.55	<.0001		
	c ₀	0.503687	0.0895	5.63	<.0001		
11y13	a ₀	7.076E-6	2.467E-6	2.87	0.0045	0.0213	0.850
	b ₀	2.469608	0.1149	21.49	<.0001		

Factibilidad del uso de los residuos del aprovechamiento forestal para propósitos bioenergéticos en la región de El Salto, Durango

Sp	Parm	θ_i	StdE	t-value	P > t	RMSE	R_a^2
	c ₀	0.293489	0.0936	3.13	0.0020		
170y172	a ₀	0.000023	6.694E-6	3.42	0.0007	0.0311	0.822
	b ₀	1.922238	0.1021	18.84	<.0001		
	c ₀	0.872759	0.1055	8.27	<.0001		

Sp= especies, Parm= Parámetro del modelo, θ_i = Estimador del parámetro, StdE= Error estándar, t-Value= Valor de probabilidad de la distribución *t* de student, P > | t | probabilidad calculada, RMSE= Raíz del Error Medio Cuadrático y R_a^2 = Coeficiente de determinación ajustado.