

**Universidad de Ciencias y Artes de Chiapas**  
**Facultad de Ingeniería**  
**Sede Villa Corzo**

***Potencial energético del uso de residuos forestales  
para la elaboración de biocombustibles***

**Tesis profesional**

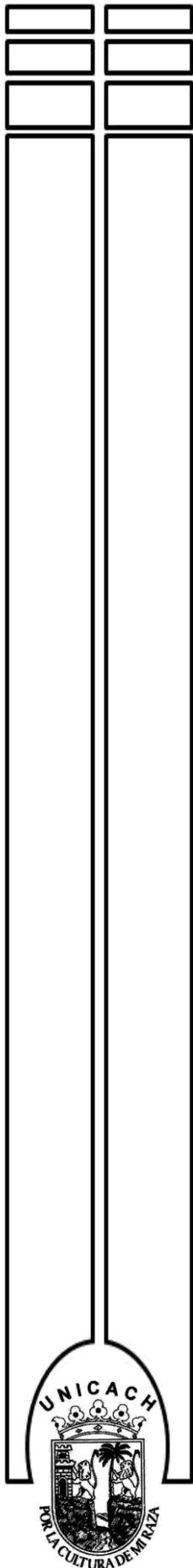
**Como requisito para obtener el título de  
Ingeniero Agroforestal**



**INGENIERÍA  
AGROFORESTAL**

**Luis Antonio Castellanos Ramírez**

**Villa Corzo, Chiapas; marzo 2023**



**Universidad de Ciencias y Artes de Chiapas**  
**Facultad de Ingeniería**  
**Sede Villa Corzo**

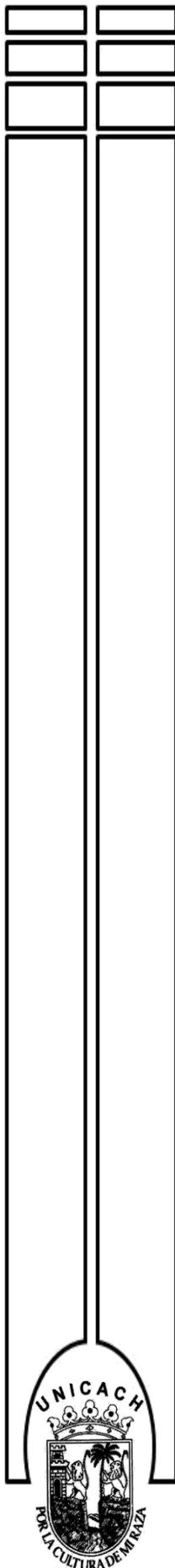
***Potencial energético del uso de residuos forestales  
para la elaboración de biocombustibles***

**Tesis profesional**  
**Como requisito para obtener el título de**  
**Ingeniero Agroforestal**

**Presenta**  
**Luis Antonio Castellanos Ramírez**

**Director**  
**Dr. Miguel Prado López**

**Villa Corzo, Chiapas; marzo 2023**



Potencial energético del uso de residuos  
forestales para la elaboración de  
biocombustibles



# UNIVERSIDAD DE CIENCIAS Y ARTES DE CHIAPAS

## SECRETARÍA GENERAL

### DIRECCIÓN DE SERVICIOS ESCOLARES

#### DEPARTAMENTO DE CERTIFICACIÓN ESCOLAR

#### AUTORIZACIÓN DE IMPRESIÓN

Villa Corzo Chiapas  
28 de febrero de 2023

C. Luis Antonio Castellanos Ramírez

Pasante del Programa Educativo de: Ingeniero Agroforestal

Realizado el análisis y revisión correspondiente a su trabajo recepcional denominado:  
Potencial energético del uso de residuos forestales para la elaboración de biocombustibles

En la modalidad de: Tesis Profesional

Nos permitimos hacer de su conocimiento que esta Comisión Revisora considera que dicho documento reúne los requisitos y méritos necesarios para que proceda a la impresión correspondiente, y de esta manera se encuentre en condiciones de proceder con el trámite que le permita sustentar su Examen Profesional.

ATENTAMENTE

#### Revisores

Mtro. Alder Gordillo Curiel

Mtro. Vicente Pérez Madrigal

Dr. Miguel Prado López

#### Firmas:

Ccp. Expediente



# UNIVERSIDAD DE CIENCIAS Y ARTES DE CHIAPAS

SECRETARÍA GENERAL

DIRECCIÓN DE SERVICIOS ESCOLARES

DEPARTAMENTO DE CERTIFICACIÓN ESCOLAR

AUTORIZACIÓN DE IMPRESIÓN

Villa Corzo, Chiapas  
07 de marzo de 2023

C. Dr. Luis Alfredo Rodríguez Larramendi

Director de: La Facultad de Ingeniería

Presente

Adjunto al presente me permito enviar a usted relación debidamente requisitada, con la cual hago de su conocimiento y compruebo que he entregado un ejemplar denominado:

Conocimiento local de la diversidad arbórea presentes en ranchos ganaderos del ejido

Monterrey, Villa Corzo, Chiapas

Impreso y en electrónico que me fue autorizado, a efecto de que proceda con el trámite a que haya lugar.

ATENTAMENTE

*Luis Antonio C.R.*

Luis Antonio Castellanos Ramírez

Nombre y firma del (la) Sustentante  
No. de matrícula 85118010

CCP. Expediente



# UNIVERSIDAD DE CIENCIAS Y ARTES DE CHIAPAS

## SECRETARÍA GENERAL

### DIRECCIÓN DE SERVICIOS ESCOLARES

### DEPARTAMENTO DE CERTIFICACIÓN ESCOLAR

### AUTORIZACIÓN DE IMPRESIÓN

Anexo

Unidad Académica: Dr. Luis Alfredo Rodríguez Larramendi 1 Impreso y un electrónico

Biblioteca: C. Jaqueline Zea Gordillo 1 Electrónico

Presidente: Mtro. Alder Gordillo Curiel  1 impreso

Secretario: Mtro. Vicente Pérez Madrigal  1 impreso

Vocal: Dr. Miguel Prado López  1 impreso

ATENTAMENTE



Luis Antonio Castellanos Ramírez

Nombre y firma del (la) Sustentante

No. de matrícula\_\_85118010\_\_\_\_\_

## Índice

1. Resumen.....	3
Abstract.....	4
2. Introducción.....	5
3. Objetivos.....	10
3.1. Objetivos específicos.....	10
4. Marco teórico.....	11
4.1. El problema energético en el Antropoceno.....	11
4.2. Residuos agroindustriales como biocombustibles.....	13
4.3. Características específicas de los Pellets.....	15
4.4. Ventajas del uso de pellets.....	16
4.5. Desventajas del uso de pellets.....	18
5. Planteamiento del problema.....	20
6. Justificación.....	21
7. Materiales y métodos.....	24
8. Resultados y discusión.....	27
9. Conclusiones.....	37
10. Bibliografía.....	38

## Índice de cuadros y figuras

Figura 1. Biomasa leñosa en forma de astillas (González Trejo, 2021).....	13
Figura 2. Pellets de madera usado como biocombustible (Belén Prado et al., 2017).....	15
Figura 3. Realización de las encuestas.....	26
Tabla 1. Especies más usadas en las actividades económicas evaluadas de la región Frailesca.	28
Figura 4. Tipos de residuos de mayor generación en las actividades económicas evaluadas de la región Frailesca.....	29
Figura 5. Disposición en la que los residuos son organizados por los propietarios de los negocios.	32
Figura 6. Carpintería localizada en Villa Corzo, Chiapas. ....	33
Figura 7. Carpintería que forma parte de una ferretería localizada en La Concordia, Chiapas.....	33
Figura 8. Temporalidad de la producción de residuos forestales en la región Frailesca.....	34
Figura 9. Porcentaje de los problemas que se encuentran ligados a la retención de residuos forestales en los negocios encuestados.....	35
Figura 10. Tamizado de la materia prima según su tamaño (Escobar Ernesto Weil P, 2018).....	42
Figura 11. Prensa pelletera (Escobar Ernesto Weil P, 2018).....	42
Figura 12. Equipo enfriador de pellets (Escobar Ernesto Weil P, 2018).....	43
Figura 13. Pellets siendo envasados al final del procedimiento (Escobar Ernesto Weil P, 2018).	44

## 1. Resumen

La crisis energética global y la descarbonización de la economía mundial demanda el uso de energías renovables bajo el enfoque de cero residuos. En este sentido los residuos forestales representan una oportunidad viable para la producción de bioenergéticos y la reducción de problemas de disposición inadecuada de estos residuos. En esta investigación se evaluaron las potencialidades de los residuos forestales generados en la región Frailesca, con el fin de producir pellets y briquetas. Los datos fueron recopilados a través de entrevistas semiestructuradas y observaciones en campo en pequeñas industrias que generan residuos forestales en seis de las localidades con mayor número de población de la región Frailesca. Las especies más comunes utilizadas por las actividades económicas son varias especies del género *Pinus* y especialmente dos especies: *Pinus montezumae* y *Pinus strobus* las que predominaban. Las características de los residuos indican que hay una posibilidad para el mercado de los pellets de madera. Sin embargo, se necesita de apoyos institucionales para la implementación de la biomasa como una alternativa que necesita la región para suplir sus necesidades energéticas. Por todo esto concluimos que la producción de pellets de madera en la región Frailesca no es viable, actualmente debido a la poca infraestructura con la que cuenta la región.

**Palabras Clave:** Biomasa, Biocombustibles, Bioenergía, Pellets, Energías renovables.

## **Abstract**

The global energetic crisis and the global economic decarbonization requires the use of renewable energies focused on zero residues. Hence forest wastes arise as a suitable option for bioenergetic production and the reduction of pollution due inappropriate disposal of these kind of wastes. In this research were assessed the potential of forest wastes produced in Frailesca zone to make fuel pellets and fuel briquets. Data were collected through semi structured interviews and field observations on small industries that produce forest wastes. These observations were developed in six of the most populated cities along Frailesca region. The most common species used on these small industries were several species of *Pinus* genera and specifically two species: *Pinus montezumae* and *Pinus strobus*. The characteristics of wastes assessed showed high potential to commercialization of pellets and briquets. However, more institutional conditions are needed to implement biomass as fuel alternative to cover energetic needing. Altogether, we conclude that production of fuel pellets and fuel briquets is not feasible due the lack of infrastructure in the Frailesca zone.

**Keywords:** Biomass, Biofuels, Pellets, Renewable energy, Energy alternatives.

## **2. Introducción**

La humanidad es incapaz de desconectarse de su propia dependencia energética, es difícil imaginar alguna actividad económica que no implique el gasto de combustibles fósiles. Tras la crisis del petróleo de 1973 se generó un debate acerca de los planes para compensar la falta de este hidrocarburo. Adicionalmente el cambio climático es un fenómeno global que se está produciendo debido a la emisión de gases de efecto invernadero (GEI) a la atmósfera. Estos gases, en particular el dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), se emiten principalmente como resultado de la quema de combustibles fósiles (como el petróleo, el gas natural y el carbón) para generar energía y movilidad, así como a través de actividades humanas como la deforestación y la agricultura intensiva. Supone un tema de carácter planetario que las investigaciones en la última década han tratado de abordar para proponer soluciones. Es de estos esfuerzos donde provienen las iniciativas hacia las fuentes renovables.

Una de las opciones para sustituir las energías fósiles es el uso de biocombustibles, específicamente los pellets de madera, briquetas y astillas de combustión. Éstos, son sólidos cilíndricos, que cumplen con las mismas funciones de la leña. En esta investigación se busca conocer el potencial del uso de residuos forestales como biocombustibles sólidos como una alternativa a la leña en la región Frailesca.

Las briquetas de combustión son un tipo de biocombustible que se produce a partir de material orgánico como la madera, la cáscara de coco, la pulpa de frutas y verduras, o los residuos de la industria agrícola y forestal. Las briquetas se producen mediante un proceso de prensado en el que se comprimen estos materiales orgánicos en forma de

pequeñas barras o pastillas. Una vez comprimidas, las briquetas se dejan secar y endurecer, lo que les permite ser utilizadas como combustible.

Las briquetas de combustión son un biocombustible porque son producidas a partir de material orgánico renovable. Esto significa que su producción no agota los recursos naturales como ocurre con los combustibles fósiles, y que pueden ser producidas de forma sostenible. Además, las briquetas de combustión son una fuente de energía limpia, ya que su quema emite menos dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) y otros gases de efecto invernadero que los combustibles fósiles. Estas características las convierten en una opción interesante para reducir el impacto del cambio climático y mejorar la calidad del aire en las zonas donde se utilizan.

Las fuentes de energía renovables son una alternativa atractiva debido a varias razones. En primer lugar, las fuentes de energía renovables son una fuente de energía limpia y sostenible, lo que significa que no emiten dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) u otros gases de efecto invernadero a la atmósfera. Esto las convierte en una opción interesante para reducir el impacto del cambio climático. En segundo lugar, las fuentes de energía renovables son abundantes y están disponibles en casi todas partes del mundo, por lo que pueden ser utilizadas para satisfacer la demanda de energía de una forma más equitativa. Además, las fuentes de energía renovables son generalmente más seguras y menos propensas a causar accidentes que las fuentes de energía no renovables. Por último, las fuentes de energía renovables tienen un menor impacto en el medio ambiente y pueden contribuir a la conservación de los recursos naturales.

La implementación de biocombustibles en forma de pellets tiene varias ventajas, por ejemplo, puede cubrir una gran diversidad de necesidades energéticas tales como

cocina, confort, industria, transporte y electricidad (Fernández, 2003). Se adaptan a todos los campos de utilización de los combustibles tradicionales. Se pueden utilizar una gran diversidad de residuos agropecuarios y forestales que actualmente son residuos que pueden causar problemas de contaminación. Es una alternativa de bajo costo que puede representar una fuente de ingresos extra. Puede mitigar el impacto del uso de la cobertura vegetal al ser un sustituto de la leña.

Aunque los pellets, por si solos, no sean capaces de satisfacer la demanda, es importante saber si funcionan como productos complementarios. La implementación de los biocombustibles a partir de residuos agroindustriales es muy prometedora para México, incluso si solo es para su uso doméstico (Montoya & Ximhai, 2010).

Es importante conocer el potencial de los biocombustibles por varias razones. En primer lugar, el conocimiento del potencial de los biocombustibles es necesario para poder evaluar su viabilidad como fuente de energía alternativa a los combustibles fósiles. Esto permite determinar si los biocombustibles pueden satisfacer una parte significativa de la demanda de energía de una forma sostenible y rentable. En segundo lugar, el conocimiento del potencial de los biocombustibles es importante para desarrollar estrategias efectivas de producción y utilización de estos combustibles. Por ejemplo, saber cuáles son las fuentes de materia prima más adecuadas y cuáles son las tecnologías más eficientes para producir biocombustibles de alta calidad. Finalmente, el conocimiento del potencial de los biocombustibles es importante para poder tomar decisiones informadas sobre su uso y su contribución a la mitigación del cambio climático.

Para determinar la asequibilidad de los pellets como biocombustible en la región Frailesca es importante conocer las características específicas de las fuentes de materia prima y la disponibilidad a lo largo del año. El propósito de esta investigación es no solo la de determinar las capacidades y potencialidades de los pellets de madera, sino también la investigación hacia un foco más prominente a estos, conocer los beneficios tanto económicos como ecológicos, además de funcionar como un puente para que el país pueda optar por fuentes de energías renovables.

Al final concluimos en que la producción de pellets de madera en la región Frailesca no es viable actualmente debido a la poca preparación con la que cuenta la región. Aunque hay estados del país que cuentan con una infraestructura capaz de impulsar el mercado de los pellets en la región Frailesca no es el caso.

Existen varias opciones que podrían ser consideradas para hacer factible la producción y utilización de pellets de madera en la región Frailesca, algunas de ellas podrían ser:

- Invertir en infraestructura: este sería el punto clave a la hora de producir y distribuir los pellets de manera eficiente, es necesario contar con una infraestructura capacitada, como plantas de producción, almacenes y transporte entre otros.
- Promover el desarrollo de la industria maderera: es necesario que en la región Frailesca se mantenga un flujo constante de materia prima sin afectar a las áreas verdes de la misma, se podría promover el desarrollo de la industria maderera en la región, incentivando la plantación de árboles y la gestión sostenible de los bosques.
- Establecer alianzas con empresas especializadas: siendo parte de uno de los estados más importantes de la nación por su biodiversidad se necesitan las

alianzas con empresas especializadas en la producción de pellets, que podrían aportar su experiencia y tecnología para hacer viable el proyecto.

- Estudiar la disponibilidad de otras fuentes de biomasa: si el acceso a fuentes de madera es limitado o se busca expandir, se podría estudiar la posibilidad de utilizar otras fuentes de biomasa para la producción, como residuos agrícolas o forestales.
- Fomentar la creación de un mercado local para los pellets de madera: se podría fomentar el uso de los pellets de madera como combustible para calefacción y generación de electricidad en la región, mediante publicidad y programas de incentivos.
- Impulsar políticas públicas que favorezcan la producción y uso de biocombustibles renovables: se podría establecer políticas públicas que promuevan el desarrollo de la producción y uso de biocombustibles renovables en general y los pellets de madera en particular, como por ejemplo subvenciones, impuestos reducidos.

### **3. Objetivos**

Evaluar el potencial de los residuos forestales para la elaboración de bioenergéticos en la región Frailesca

#### **3.1. Objetivos específicos**

1. Caracterizar el tipo de residuos forestales que se generan por actividades económicas relacionadas con el proceso de madera.
2. Categorizar las actividades productivas que generan residuos forestales con potencial para la utilización como bioenergéticos.
3. Estimar la producción de residuos forestales que se les puede dar un valor agregado a través de la bioenergía.

## **4. Marco teórico**

### **4.1. El problema energético en el Antropoceno**

Existen dos grandes problemas que enfrenta el mundo en el área energética: la disminución de las reservas petroleras y la contaminación causada por el abuso de combustibles fósiles. La producción de CO<sub>2</sub> aumentó de 4 millones de toneladas a más de 28 millones durante los últimos 60 años (Forero Núñez et al., 2012). En respuesta a esta problemática, la inversión en proyectos de energías renovables aumentó de 20 a 160 billones de dólares entre el 2004 y 2010. Esto permitió la creación y el desarrollo de nuevas industrias y de nuevas tecnologías dedicadas a la generación de energía mediante fuentes renovables, de tal manera que en la actualidad se produce más del 3% de la energía global a base de dichas fuentes (Forero Núñez et al., 2012).

Las energías renovables son prácticamente inagotables en condiciones adecuadas, es decir, bajo prácticas sustentables. Dentro de estos tipos de energía encontramos la energía solar, eólica, hidráulica y la biomasa. De ésta última se puede obtener biocombustibles, definidos como combustibles sólidos, líquidos o gaseosos potencialmente renovables, que pueden utilizarse para la generación de electricidad, calor y energéticos (Carlos Fernández-Linares et al., 2012). La producción de biocombustibles en el mundo ha crecido exponencialmente y se muestra como la principal oportunidad de sustitución que tienen los países desarrollados y emergentes para responder a la demanda energética y garantizar el consumo interno, así como también, mitigar los efectos producidos por los gases de efecto invernadero (Gómez, 2016).

Las energías renovables en forma de biomasa no son las únicas opciones para abordar el problema energético en la actualidad. Es posible la utilización de tecnologías más eficientes y sostenibles para generar, transportar y utilizar la energía. Por ejemplo, se pueden utilizar tecnologías de generación de energía limpia como las centrales solares o eólicas, o tecnologías de transporte y distribución de energía más eficientes. Otra opción es la implementación de políticas y programas que fomenten el uso racional y eficiente de la energía, como la promoción de la eficiencia energética en el hogar, en la industria y en el transporte.

En América Latina la producción de biocombustibles es liderada por Brasil, Argentina y Colombia, según datos del último estudio sobre biocombustibles publicado por la CEPAL en el año 2005, y se ha convertido en la mejor opción de fuente energética para competir con el petróleo, dados los avances tecnológicos con que cuentan estos países, para el abastecimiento y el consumo, particularmente en sectores como el transporte (Gómez, 2016). Aunque México no figura en las listas de consumo y producción de biocombustibles (José Mantulak-Stachuk et al., 2013), ya se están implementando estrategias en las energías eólicas, solares y mareomotrices y biocombustibles a partir de caña y granos (Carlos Fernández-Linares et al., 2012). El tema de los biocombustibles ha cobrado importancia en los últimos años, se menciona en numerosas investigaciones y el término “biomasa” fue el tema más investigado entre los años 1982 y 2012 (Rodríguez de San Miguel & A. Jorge, 2019). Finalmente, México tiene un gran potencial para el desarrollo de esta industria y podría alcanzar los primeros puestos entre las naciones generadoras de energía sostenible. Sin embargo, el consumo incesante de petróleo ha obstaculizado la transición a una economía verde (Rodríguez de San Miguel & A. Jorge, 2019).

## 4.2. Residuos agroindustriales como biocombustibles

La biomasa es la principal fuente de energía renovable en todo el mundo, las estimaciones de implementación varían del 44 % al 65 % y la Agencia Internacional de Energía prevé que la capacidad de generación eléctrica global a base de biomasa aumentará diez veces, de 50 GW (Giga watts) en el 2009 a 560 GW en el 2050, según el Plan de Expansión de la Generación Eléctrica 2016-2035 del ICE (Torres et al., 2018). En México, la leña es la forma de energía renovable de mayor consumo, representa el 18% de la matriz energética y en el sector residencial, la leña ocupa el 65% del consumo energético (FAO, 2012). Este porcentaje es mayor en el sur de México donde la importancia de la leña puede ser mayor que en otras zonas del país. En el sur de México, la combustión de leña en artefactos de baja eficiencia provoca el deterioro de la calidad del aire de varias ciudades del centro-sur y sur, principalmente en los meses de invierno debido a que es el combustible más económico con que cuenta la población rural para su calefacción (Fernández-Puratich et al., 2014).



Figura 1. Biomasa leñosa en forma de astillas (González Trejo, 2021).

La biomasa es una fuente de energía renovable que se obtiene a partir de material orgánico biodegradable como la madera, la cáscara de coco, la pulpa de frutas y verduras, o los residuos de la industria agrícola y forestal. La biomasa puede ser utilizada como combustible directamente, o bien puede ser procesada para producir biocombustibles como los pellets de madera o las briquetas de combustión.

La biomasa es considerada una fuente de energía renovable porque se obtiene de materia orgánica que se puede producir de forma sostenible y en cantidades suficientes para satisfacer la demanda de energía. Además, la biomasa es una fuente de energía limpia, ya que su quema emite menos dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) y otros gases de efecto invernadero que los combustibles fósiles. Estas características la convierten en una opción atractiva para reducir el impacto del cambio climático y mejorar la calidad del aire en las zonas donde se utiliza.

En México, la industria de la madera genera enormes cantidades de residuos que no se usan y que tienen un alto potencial para la producción de energía al ser sometidos a un proceso de compactación para aumentar su densidad energética a manera de pellets, una actividad capaz de producir cerca de 10 millones de toneladas de pellets al año y que ha generado una industria creciente en Europa, Canadá y Estados Unidos (Forero Núñez et al., 2012). Esta investigación es de gran importancia ya que no hay suficientes datos acerca del potencial energético de la biomasa a comparación de otros estados y se busca contribuir a esta brecha de información.

### 4.3. Características específicas de los Pellets

Los pellets y briquetas son principalmente sólidos cilíndricos que sirven como un combustible compactado y se consumen del mismo modo que lo haría la leña, aunque estos biocombustibles se diferencian principalmente por su tamaño. Las briquetas poseen diámetros entre 50mm y 90 mm, y longitudes entre 74mm y 300mm, mientras que el diámetro del pellet es inferior a 10mm y la longitud no mayor a 30mm. Para más información sobre la elaboración detallada de pellets, se puede consultar el Anexo 1.



Figura 2. Pellets de madera usado como biocombustible (Belén Prado et al., 2017).

Los pellets son un producto que tiene el potencial de producirse en grandes cantidades no sólo con una amplia gama de residuos agroindustriales sino también con especies de rápido crecimiento (Tenorio et al., 2016). Todos los subproductos provenientes de aserraderos (virutas, aserrín y astillas) tienen el potencial para funcionar como biomasa para generar energía térmica través de pellets, astillas de combustión y briquetas. Otros residuos forestales como las ramas, troncos o madera también tienen potencial para ser usados como comprimidos (Torres et al., 2018). Sin embargo, los residuos de bosques

naturales y cultivados son recursos renovables, que generalmente, son abandonados como desechos (Atuesta Boada et al., 2015).

En este contexto de demanda de energías limpias, ha surgido un mercado dedicado a la fabricación de biocombustibles sólidos constituidos por materias lignocelulósicas procedentes del sector agrícola o forestal y de las industrias de transformación que producen residuos de dicha naturaleza con los que se pueden elaborar pellets o briquetas (Tenorio et al., 2016, Forero Núñez et al., 2012). Debido al crecimiento acelerado en la demanda de pellets y a la imposibilidad de producir más residuos de madera, es necesaria la evaluación de distintas fuentes de biomasa para la producción de pellets de tal forma que cumplan ciertos estándares de calidad (Forero Núñez et al., 2012). Para esto, existen las normas que evalúan el diámetro, la longitud, densidad, contenido de agua, contenido de ceniza, poder calorífico superior e inferior, contenido de Azufre, Potasio, Cloro, Cadmio, Zinc y Plomo, entre otros (Forero Núñez et al., 2012).

#### **4.4. Ventajas del uso de pellets**

Los pellets son de fácil obtención, tienen un bajo costo de recolección y emiten bajos niveles de gases de efecto invernadero cuando se emplean en artefactos de alta eficiencia, se ha visto que reducen las emanaciones de CO<sub>2</sub> en 50% comparado con la combustión de leña o astillas. Poseen bajas concentraciones de azufre (entre 0,004% y 0,007% del peso seco final de cada pellet) y de nitrógeno (entre 0,05% y 0,16% del peso seco final de cada pellet) (Tenorio et al., 2016). El aumento de la densidad energética de la biomasa proporciona bajos contenidos de humedad y de cenizas, disminuyen los costos de transporte y almacenamiento y permiten una estandarización de tamaños y composición, lo que hace que sea más fácil la alimentación de hornos domésticos e

industriales (Tenorio et al., 2016). Actualmente el aprovechamiento de pellets se da mediante procesos de combustión directa; sin embargo, la gasificación de estos puede generar mayor valor agregado al producir gas de síntesis con elevado poder calorífico y menores cantidades de emisiones, aunque el análisis de este proceso es aún poco explorado (Forero Núñez et al., 2012).

La utilización de pellets de madera no tiene un efecto significativo en la salud humana, sin embargo, la utilización de pellets como fuente de energía puede contribuir indirectamente a mejorar la calidad del aire en las zonas donde se utilizan. La quema de combustibles fósiles como el carbón o el petróleo puede liberar a la atmósfera una gran cantidad de contaminantes que pueden afectar la salud humana, como partículas finas o monóxido de carbono (CO). Al utilizar pellets en lugar de combustibles fósiles, se puede reducir la cantidad de contaminantes liberados a la atmósfera, lo que puede contribuir a mejorar la calidad del aire y, en consecuencia, a mitigar algunas enfermedades relacionadas con la contaminación del aire.

Otra de las ventajas es que los pellets pueden ser elaborados a partir de biomásas mixtas, como residuos agrícolas que pueden producir sólidos con suficiente dureza, resistencia al transporte y un poder calorífico cercano al de los pellets de madera (Forero Núñez et al., 2012). Los pellets a partir de biomásas mixtas son una industria mucho más pequeña que la de los pellets de madera, aunque presentan un crecimiento considerable. La producción de este tipo de pellets se centra en Dinamarca, Finlandia y Polonia, aunque Francia es el país que posee los mayores niveles de capacidad instalada (Forero Núñez et al., 2012).

#### **4.5. Desventajas del uso de pellets**

Uno de los principales problemas que enfrenta la industria de elaboración de pellets es que la materia prima proviene de los residuos de las empresas madereras, por lo que las variaciones temporales en la producción pueden generar un desabastecimiento (Belén Prado et al., 2017).

Una alternativa a la interrupción temporal del abastecimiento de residuos es la elaboración de pellets a partir de residuos agroindustriales y biomásas mixtas. Los pellets elaborados con biomásas mixtas suelen tener menor grado de aglomeración, aunque tienen ciertas ventajas en cuanto al aumento del poder calorífico (Atuesta Boada et al., 2015). Otro de los inconvenientes que poseen los pellets a partir de biomásas mixtas son los altos contenidos de azufre y de cloro que genera problemas de corrosión, taponamiento en los equipos y aumenta las emisiones de gases de efecto invernadero (Forero Núñez et al., 2012). Con base en los niveles de cloro y azufre estos productos sólo pueden ser utilizados para la producción de energía en grandes industrias que puedan financiar los sistemas de tratamiento de los gases de salida sin perjudicar en gran medida la rentabilidad del proceso (Forero Núñez et al., 2012).

Además de los pellets elaborados a partir de materia prima mixta existen aquellos elaborados a partir de masa fúngica, aunque estos requieren de procesos y tratamiento mucho más especializado, además de muchas variaciones, no es posible establecer una metodología general para la formación de gránulos fúngicos. El uso de gránulos fúngicos es un tema ampliamente estudiado debido a su amplia gama de aplicaciones (García-Reyes et al., 2017).

El aserrín es un material que hay en gran cantidad y es de bajo costo, sin embargo, tiene una densidad muy baja, por lo que, grandes volúmenes equivalen a pocas toneladas, lo que representa una limitante de la carga del aserrín desde el aserradero a la planta de tratamiento. La carga máxima que se admite en un camión está cerca de las 28 toneladas mientras que lo máximo que se puede cargar de aserrín seco son 12 toneladas. Esto hace que se requieran más camiones para su carga, aumentando el costo de este residuo en temas logísticos y de transporte (Belén Prado et al., 2017).

Otra desventaja es que, durante su fabricación, los pellets deben ser sometidos a un proceso de secado, esto implica un problema ya que el tiempo empleado es muy largo y existe la alta probabilidad de que se proliferen los microorganismos produciendo pérdida de calidad y proteínas (Chamorro Sangoquiza, 2012). Finalmente, originalmente se pensaba que los biocombustibles, al ser fabricados a partir de recursos renovables, podrían obtenerse de manera infinita, sin embargo, el crecimiento de la población mundial y su consecuente demanda de alimentos y otros bienes plantea una disyuntiva entre el empleo de tierras para alimentación o para energía (Ramos et al., 2016).

Aunque los biocombustibles a base de residuos agroindustriales y biomasa parecen una solución atractiva para las necesidades energéticas de la nación también presenta un conflicto respecto a la propiedad o el arrendamiento de tierras para su producción. El agotamiento de los suelos fértiles y la contaminación obstaculizan el lugar de estos biocombustibles, ya que al no ser tan eficientes como otras fuentes de energía no presentarían un alto retorno sobre su inversión (Serna et al., 2011).

El gas LP es una mezcla de hidrocarburos gaseosos que se utiliza como combustible. Está formado principalmente por propano y butano, dos tipos de gas licuado del petróleo

(GLP) que se obtienen a partir del refinamiento del petróleo o del gas natural. Un posible y fuerte competidor contra los biocombustibles puede ser el gas LP, este es un combustible versátil que se puede utilizar en una gran variedad de aplicaciones, desde la cocina y el calentamiento de agua hasta el secado de alimentos y la generación de energía eléctrica.

El gas LP es importante a destacar por su importancia en la capacidad para proporcionar energía de forma limpia y eficiente. En comparación con otros combustibles como la leña o el carbón, el gas LP emite menos dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) y otros gases de efecto invernadero, lo que lo convierte en una opción más sostenible y amigable con el medio ambiente. Además, el gas LP es un combustible de alta calidad y rendimiento, lo que lo hace ideal para aplicaciones donde se requiere energía confiable y consistente. A pesar de estas cualidades el gas LP posee otro de los problemas que comparte con los pellets de madera, el no ser del todo accesible para ciertas localidades de la región Frailesca.

## **5. Planteamiento del problema**

En algunas zonas de Chiapas, debido a la escasez de leña y la presencia de pequeñas industrias, la compra de leña es una actividad común y en algunas comunidades de los altos de Chiapas se ha identificado una reducción de la abundancia de las especies preferidas principalmente por tres factores: el cambio de uso del suelo, el crecimiento de la población y aumento de la demanda y la sobredemanda de especies preferidas de uso como leña.

Esta investigación tiene como objetivo determinar el potencial de los residuos generados en la región Frailesca para la elaboración de pellets, pero también busca generar

atención en torno a la producción de biocombustibles como una forma de energía alternativa a nivel nacional. Además, se espera que esto pueda impulsar la generación de información sobre el tema por parte de las instituciones gubernamentales

Los pellets producidos a partir de residuos agroindustriales se presentan como una de las alternativas para producir energía eléctrica y sustituir el consumo de leña. Si bien aún es necesario optimizar el sistema para aprovechar todas las propiedades térmicas de los pellets, ya es una industria creciente que satisface más de 7.5 billones de toneladas por año no se ha implementado del mismo modo en México (Forero Núñez et al., 2012).

## **6. Justificación**

La Ley General para el Cambio Climático (2014) estableció el objetivo de generar el 35% de las necesidades energéticas de la nación a partir de fuentes renovables para el año 2024. El uso de biocombustibles derivados de residuos agropecuarios representa una alternativa para cumplir con estos objetivos por varias razones. La elaboración de pellets puede ayudar al desarrollo de la industria de biocombustibles en México que busca fomentar la economía competitiva generadora de empleos y sustentabilidad ambiental. La aplicación de estas tecnologías también puede incentivar la seguridad energética al diversificar las fuentes de energía sin poner en riesgo la seguridad alimentaria del país y tomando en cuenta el desarrollo rural y el impacto ambiental (Montoya & Ximhai, 2010).

La producción de pellets también es una salida óptima para la utilización de residuos de plantaciones maderables o energéticas de árboles de crecimiento rápido y bajo valor productivo (Atuesta Boada et al., 2015). Si bien existen numerosas empresas que se dedican a la producción de madera aserrada, los residuos que surgen de estas labores

son considerados como basura. Debido a su estatus como un deshecho sin utilidad se han acumulado a puntos donde presentan serios problemas ambientales, son capaces de provocar incendios en verano, y ocupan espacio valioso dentro de las instalaciones (Moreno-López et al., 2011).

Los pellets se presentan como una solución viable para el manejo de residuos de madera y recortes de árboles urbanos pueden utilizarse como una fuente de biomasa, para la producción de biocombustibles a utilizarse en la generación de calor. Se ha documentado que los pellets se pueden elaborar a partir de diversos tipos de materiales como la paja y los restos de poda de maderables y frutales, la leña, las cortezas y los restos de podas y aclareos de las masas forestales son materia típica para elaboración de biocombustibles sólidos de origen agrario (Fernández, 2003). También funcionan las cáscaras de frutos secos y huesos de aceituna y otros frutos procedentes de la extracción del aceite y los restos de las industrias del corcho, la madera y el mueble, constituyen una buena materia prima para la fabricación de biocombustibles sólidos (Fernández, 2003).

El análisis del potencial energético de la biomasa puede ayudar a la sociedad de varias maneras:

- Permite identificar fuentes de energía renovable disponibles en una región específica, lo que puede contribuir a reducir la dependencia de fuentes de energía no renovables.
- Ayuda a planificar y desarrollar proyectos de generación de energía a partir de biomasa, lo que puede contribuir a la creación de empleo y al desarrollo económico local.

- Puede ayudar a reducir la huella de carbono de una región, ya que la biomasa es considerada una fuente de energía de bajo impacto ambiental.
- Puede ayudar a desarrollar políticas y programas para fomentar la producción y el uso de biocombustibles.
- Puede ayudar a los usuarios finales a tener una mayor comprensión de los beneficios y limitaciones de la biomasa como fuente de energía.

La producción de pellets reduciría el consumo de combustibles fósiles y los costos de disposición de los residuos de maderas urbanas (Moreno-López et al., 2011). En empresas como John Deere, los residuos de las tarimas de madera son triturados y usados para la fabricación de pellets, los cuales son usados para su combustión en calderas especializadas, mencionando que mientras este material no haya sido afectado por tratamientos químicos es viable usarlos para producir pellets (Moreno-López et al., 2011).

El mercado de uso doméstico de pelles está muy poco desarrollado. El principal uso que se le da a los pellets de manera doméstica es para la calefacción en el hogar. Sin embargo, una parte del mercado que está poco desarrollada ya que, para poder quemar el pellet, se necesita una caldera apta para esto, lo que implica, de base, una inversión inicial que puede ir de \$1000 USD a \$3000 USD. Los mercados potenciales de países del norte deberían ser un incentivo para promover la producción de pellets con la finalidad de usar los residuos agroindustriales de las zonas más atrasadas del país. En Europa los pellets tienen índices muy altos de consumo. La proyección del consumo de pellets en Europa hasta el año 2010 se incrementó 2,5 veces, lo cual aumentó la participación de las importaciones del 12% de la producción en el año 2006 al 34% en el 2010 (Atuesta Boada et al., 2015).

## **7. Materiales y métodos**

Para caracterizar el tipo de residuos que se generan por actividades económicas y con potencial para la producción de pellets, se aplicaron 60 encuestas en actividades comerciales relacionadas con el procesamiento de material forestal como son aserraderos y carpinterías. La encuesta original se presenta en el Anexo 2. El área de estudio comprende los centros de población de Villa Corzo, Villa Flores, San Pedro Buenavista y Revolución Mexicana, Jaltenango de la Paz y La Concordia. Todos en la región Frailesca del estado de Chiapas, México.

La encuesta se enfoca en determinar varios aspectos alrededor de la generación de residuos con potencial para la producción de pellets como identificar las actividades económicas que generan este tipo de residuos, determinar y cuantificar los tipos de residuos, identificar las especies que son usadas más comúnmente en cada actividad económica, describir cuál es la disposición final de los residuos, determinar las variaciones estacionales en la producción de residuos, el uso que se le da a los residuos y cuáles son los principales problemas asociados a la acumulación.

Los residuos se clasificaron en las siguientes categorías:

Astillas: pequeños trozos de madera triturada que no contiene ningún tipo de aditivos.

Viruta: pequeños trozos o hojas finas y rizadas que se producen al labrar la madera.

Aserrín: desperdicios que se producen del serrado de la madera, estos son los desperdicios de menor tamaño que se pueden conseguir del proceso de tratamiento de la madera.

Trocería: el termino más conocido de la trocería se refiere a los troncos de los árboles que están por ser procesados en aserraderos, pero para este caso se usa para referirse a los sobrantes más pequeños del producto más parecido generado por los aserraderos, aquellos trozos tan pequeños que no pueden volver a ser usados.

Tablas: planchas de madera demasiado delgadas y/o pequeñas para ser utilizadas.

Rodajas: dependiendo del tamaño las rodajas generadas de las carpinterías serían muy útiles para futuros proyectos, pero en este caso se refiere a rodajas muy pequeñas o que por la forma que se obtuvo no son aptas para realizar trabajos.

Para cuantificar la producción de los diferentes tipos de residuos se documentaron las percepciones aproximadas de los propietarios. La cantidad de residuos en cada negocio depende de los encargos que estos reciban y los propietarios no pueden medir de manera apropiada la cantidad de residuos generados semanalmente. Además, existe una alta variabilidad en el contenido de humedad y el volumen dependiendo de las especies con las que se trabaja.

Se determinaron también cuáles son las situaciones adversas que se les presentan a estos negocios, ya que de tenerlos podría generarse la situación de negociación para la obtención de los residuos de forma contractual, asegurando la disposición de los residuos hacia la producción de biocombustibles.



Figura 3. Realización de las encuestas.

## 8. Resultados y discusión

En esta investigación se evaluó el potencial de los residuos forestales para la elaboración de bioenergéticos en la región Frailesca. Nuestras observaciones sugieren que existe un potencial de generación de residuos de 6.687 toneladas a la semana. Con esta cantidad de residuos se estima que se podrían generar la misma cantidad de toneladas en pellets y briquetas ya sea siendo con la misma materia prima de una especie o en caso de necesidad con mezclas mixtas, que sería el caso más común. El mercado potencial de estos productos puede ser el uso doméstico y los precios de comercialización podrían alcanzar entre \$130 USD y \$186 USD por tonelada (Chiappe Vilaró et al., 2019).

Estos productos bioenergéticos pueden ser usados tanto en el uso doméstico como en industrias que requieran de un gasto calorífico, siendo puestos como una alternativa al uso del carbón. Posiblemente sean también útiles para el ámbito agropecuario, teniendo usos como fertilizante, comida y construcción.

Las actividades productivas que producen la mayor cantidad de residuos con potencial para la elaboración de pellets son las carpinterías. De las 60 encuestas aplicadas, 56 fueron carpinterías, seguido por un aserradero, una maderería, un apiario y una mueblería. En el caso de la región frailesca los aserraderos no son una actividad económica importante por lo que son muy escasos y están muy lejos de los núcleos poblacionales.

Las especies que más se utilizan y que es el origen de donde provienen los residuos forestales son, *Pinus spp* con 100% y *Cedrela odorata* con 90% (Tabla1). El *Enterolobium cyclocarpum* tiene el tercer lugar como la especie más mencionada, con un 63.33% de presencia en las encuestas. En este estudio identificamos los residuos de

*Pinus spp* como uno de los insumos más cuantiosos que se generan en la región. Las especies que más se utilizan son, *Pinus spp* (60 menciones) y en consecuencia, los residuos que más se generan en la región son de esta especie. Otras especies importantes son *Cedrela odorata* y *Enterolobium cyclocarpum* (Tabla 1)

Especies	Menciones	%
<i>Pinus spp</i>	60	100
<i>Cedrela odorata</i>	54	90
<i>Enterolobium cyclocarpum</i>	38	63
<i>Tabebuia rosea</i>	14	23
<i>Swietenia macrophylla</i>	6	10
<i>Tabebuia donnel-smithii</i>	2	3
<i>Juglans regia</i>	2	3
<i>Gmelina arborea</i>	1	2
<i>Franxinus uhdei</i>	1	2
<i>Abies alba</i>	1	2
Otros*		

\*Residuos provenientes de mezclas de maderas particularmente triplay

Tabla 1. Especies más usadas en las actividades económicas evaluadas de la región Frailesca.

El tipo de residuos que más se generan son las virutas y aserrín, ambas siendo mencionadas en el 93% de las encuestas, siguiéndoles están: astillas (46.66% de menciones), trocería (40% de menciones), tablas (28.33% de menciones), rodajas (5% de menciones) y ramas (1.66% de menciones). La cantidad de residuos producidos es lo suficientemente homogénea para mantener la constante elaboración de pellets. El aserrín y las virutas son el tipo de residuo más cercano a la homogeneidad deseable, y

aunque en numerosas encuestas se menciona también la generación de residuos como rodajas y ramas, que si necesitarían de procesamientos para reducirlo a una materia prima adecuada, los primeros estarían listos o necesitarían de mínimas modificaciones para iniciar la producción de pellets.

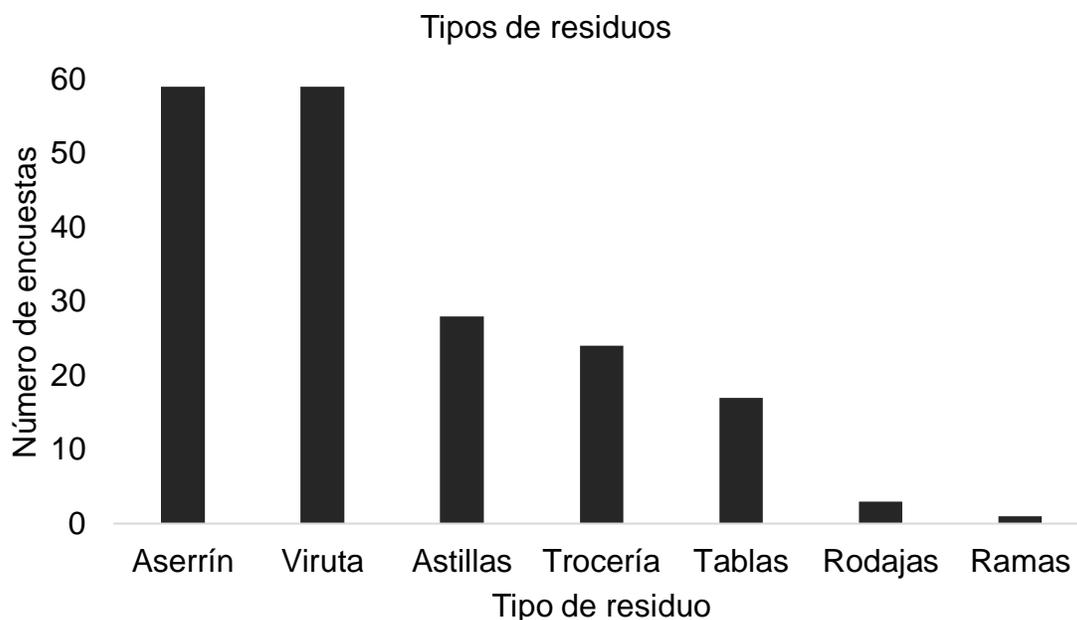


Figura 4. Tipos de residuos de mayor generación en las actividades económicas evaluadas de la región Frailesca.

En promedio la cantidad de residuos que se generan entre todas carpinterías es de 110.30 ( $\pm$  49.31 ES) kg semanales; mientras que el aserradero encuestado reveló que generaba 100 Kg semanales; la maderería 200 Kg semanales; el apiario 150 Kg semanales; y la mueblería 60 Kg semanales. Es importante recalcar que un negocio que se denominó como una carpintería por los mismos propietarios genera a la semana 3000 Kg de residuos de madera, siendo este el negocio el que más residuos de madera

genera. Si se ignora a este negocio, el promedio de residuos generados sería de 57.76 ( $\pm$  8.74 ES) Kg a la semana. Teniendo en cuenta que el total de los residuos que se genera a la semana pueden producirse hasta 6647 Kg en su máxima capacidad en las localidades evaluadas. Debido a que la producción de pellets aprovecha la totalidad de la materia prima puede esperarse que no existan desperdicios. El trabajo de campo no pudo abarcar todos los municipios de la región Frailesca, se limitó a las localidades de mayor accesibilidad por lo que la disponibilidad de los residuos maderables puede aumentar bajo análisis más exhaustivo.

Existen equipos y herramientas especializados en la elaboración de pellets, algunos equipos pequeños son capaces de producir hasta 120 kg de pellets por hora, mientras que equipos más grandes serán capaces de producir más de una tonelada de pellets por hora. Los equipos de mayor capacidad de producción son modulares y la FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura) determina ciertos parámetros que funcionan como limitadores, por ejemplo, se establecen tres configuraciones para la herramienta tornillo de prensa mecanizado las cuales son 40, 400 y 3000 kg por hora. Teniendo en cuenta los parámetros de la FAO es más conveniente escoger equipo que no excedan los mismos, ya que sería un desperdicio en tanto a gastos y potencial.

En cuanto a los problemas que se pueden resolver con la elaboración de pellets es la disposición final de los residuos de manera adecuada. En nuestro estudio encontramos que en la mayoría de los casos (43 casos) los residuos son acumulados en sitios donde no supongan un estorbo a la hora de trabajar, y se mantienen ahí hasta la hora de ser trasladados, ya sea siendo vendidos, regalados o incluso desechados. También existen

los casos donde los residuos pueden permanecer en el suelo esparcidos hasta que terminen las horas de trabajo, estos igualmente deben ser recolectados hasta que son trasladados, estos siendo un total de 15 casos. Solo en dos casos los residuos son envasados y puestos en bolsas hasta llegado el momento de su traslado. Los encuestados mencionaron que los residuos en su mayoría terminan siendo regalados a la población en general. Debido a los pocos casos de los encuestados que llegan a vender sus residuos a la población, y su contraste con el alto número de casos donde los venden o desechan, se puede intuir que no hay mucho interés por un mercado similar, uno dedicado a la venta de aserrín o virutas que sirvan para la iniciación de fuego, abono u otros. El hecho de que sean tantos los casos que terminan regalando los residuos puede ser que los destinatarios son conocidos de los dueños de los negocios, ya que si muchas personas llegaran a solicitar residuos de este tipo sin costo de manera constante el dueño del negocio podría plantearse en convertir esa actividad en un negocio.

En este escenario para la producción de pellets de madera, las plantaciones dendroenergéticas y la economía de estos negocios brinda una gran oportunidad. Debido a que en su mayoría los desechos son regalados a la hora de obtenerlos mediante un contrato o acordando un precio estos en principio permanecerían a un bajo costo y la producción de pellets iniciaría sin mayores preocupaciones en cuanto a la adquisición de la materia prima, sino manteniendo un enfoque en las áreas de calidad y logística. Mientras que, para las plantaciones dendroenergéticas, si la disponibilidad de los residuos para la población se reduce esto generaría demanda, misma que podría suplir plantaciones enfocadas a este propósito y la de generación de leña, esto sin afectar el estado de la riqueza natural.

### Disposición de los residuos

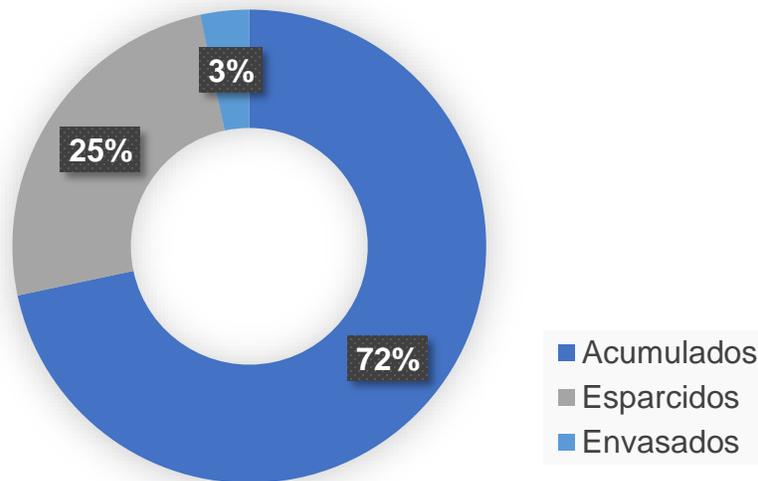


Figura 5. Disposición en la que los residuos son organizados por los propietarios de los negocios.

El primer cuatrimestre del año (enero, febrero, marzo y abril) es donde más residuos se producen, el segundo cuatrimestre (mayo, junio, julio y agosto) es donde menor producción existe y es hasta el tercer cuatrimestre donde vuelve a subir, aunque sin superar a la del primer cuatrimestre (septiembre, octubre, noviembre y diciembre). Aunque las variaciones estacionales no son significativas, por lo que podemos afirmar que la producción de residuos forestales se mantiene a lo largo del año, lo que aseguraría la continua producción de pellets a lo largo de todo el año. Cabe recalcar que, debido a que la mayoría de los negocios encuestados son negocios familiares, esta tabla también representaría los picos de actividad. Es decir, los meses donde estos negocios realizan la mayor cantidad de actividades, ya que no están sujetas a un contrato dependen de la misma población para realizar sus actividades económicas.



Figura 6. Carpintería localizada en Villa Corzo, Chiapas.



Figura 7. Carpintería que forma parte de una ferretería localizada en La Concordia, Chiapas.

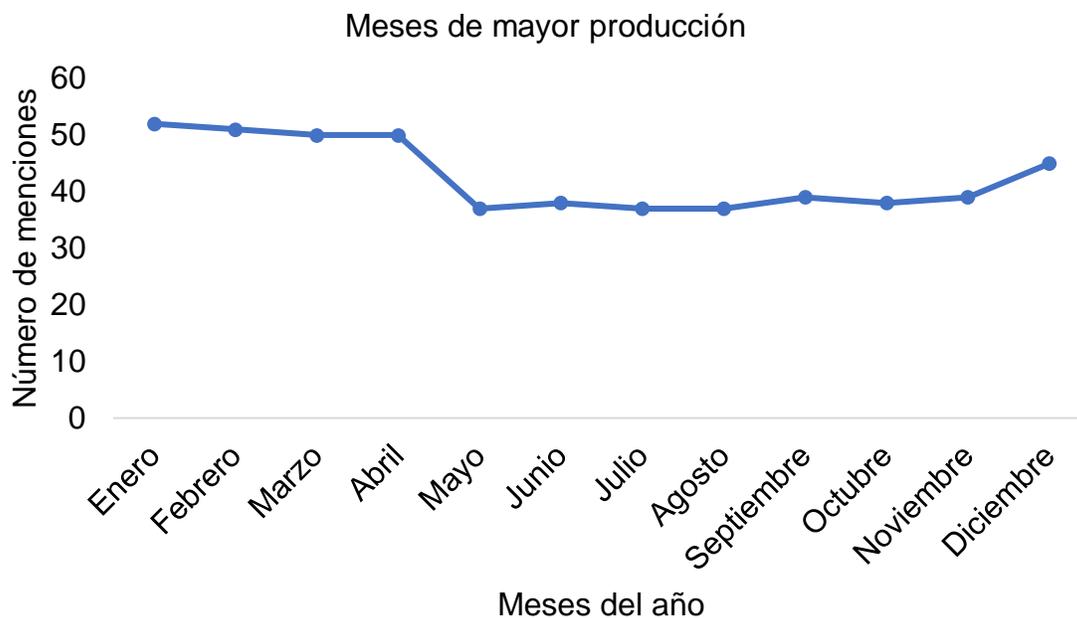


Figura 8. Temporalidad de la producción de residuos forestales en la región Frailesca.

En cuanto al uso que se da a los residuos en la actualidad la mayoría los usa como iniciadores de fuego, no como un combustible completo. También mencionaron algunos usos agropecuarios como abono, sin importar la especie, y para la crianza de pollos. Muy pocos casos mencionaron su uso para el ámbito de la construcción.

El principal problema con los residuos es que ocupan espacio útil, además de alergias particularmente con *Enterolobium cyclocarpum*, pero en este caso también se ha mencionado que con ayuda de equipo de protección no supone un problema. Un 43.33% de los encuestados mencionaron que no hay problema alguno con respecto a los residuos de madera (Figura 9).

### Problemas asociados

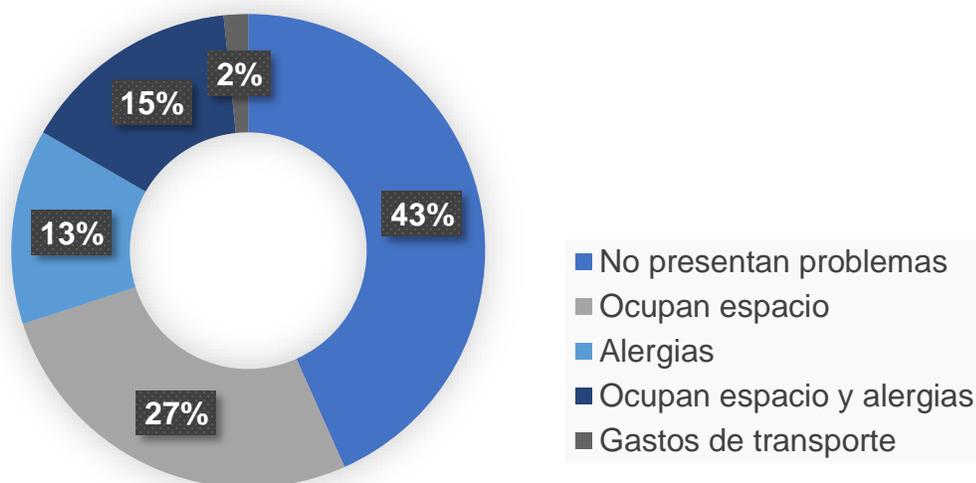


Figura 9. Porcentaje de los problemas que se encuentran ligados a la retención de residuos forestales en los negocios encuestados.

A partir de los datos recogidos en la investigación, se puede concluir que no existe un potencial suficiente para la elaboración de combustibles bioenergéticos a partir de los residuos forestales de la región Frailesca. Si bien la cantidad de residuos forestales generados es considerable (6.687 toneladas a la semana) no es seguro que pueda mantener una producción constante de pellets y briquetas. La mitad de los residuos forestales generados a la semana son pertenecientes a un solo negocio, y el resto de los negocios son susceptibles a desaparecer con el tiempo.

Las especies más utilizadas y, por lo tanto, las que más residuos generan son *Pinus spp* y *Cedrela odorata*, seguidas de *Enterolobium cyclocarpum*. El tipo de residuos que más se generan son virutas y aserrín, que son los más adecuados para la elaboración de pellets y briquetas. Aunque también se mencionan otros tipos de residuos (astillas, trocería, tablas, rodajas y ramas), estos podrían requerir procesamientos adicionales para ser utilizados en la producción de bioenergéticos.

En cuanto a la demanda de estos productos, parece que existe un mercado potencial tanto en el uso doméstico como en industrias que requieren un gasto calorífico, lo que podría ser una alternativa al uso del carbón. Además, estos productos también podrían tener usos en el ámbito agropecuario como fertilizante, comida y construcción.

En resumen, a partir de los datos obtenidos, se puede concluir que pudo existir un potencial para la elaboración de productos bioenergéticos a partir de los residuos forestales en la región Frailesca pero las condiciones actuales no lo ameritan. Sería necesario realizar una evaluación más detallada para determinar la viabilidad económica y técnica de este proyecto, incluyendo aspectos como el costo de producción, la disponibilidad de tecnología adecuada y la existencia de una cadena de suministro eficiente para garantizar la continuidad de la producción y el suministro de materia prima.

## **9. Conclusiones**

La elaboración de pellets en la región frailesca puede enfrentar algunas desventajas debido a la ausencia de equipos especializados y personal capacitado para la elaboración. El mercado incipiente para la comercialización de pellets en México también puede ser una limitante.

Si bien algunos estados del país cuentan con la infraestructura adecuada y la tradición forestal que pudiera impulsar la producción masiva de pellets con un impacto internacional, en la región frailesca de Chiapas los negocios que podrían generar la materia prima lo hacen a muy pequeña escala debido a que son negocios familiares de subsistencia sin una proyección a largo plazo.

La debilidad institucional para administrar las actividades comerciales en torno al ámbito forestal es otro aspecto que no ayuda a la organización de actividades colectivas que hagan rentable esta actividad. Durante la elaboración de este trabajo la SEMARNAT no pudo funcionar como una fuente que pudiera proporcionar datos acerca de carpinterías, aserraderos u otro negocio con las características deseables para ser encuestada, por lo que en este aspecto la región se encuentra sin descubrir.

Chiapas es uno de los estados que cuenta con la biodiversidad más rica del país, por lo que con el uso de técnicas sustentables y apoyo de la experiencia de los estados que ya están experimentando con la biomasa aseguraría un futuro renovable para el país.

## 10. Bibliografía

- Alonso, L. (2013). Operación y mantenimiento en plantas de pellets de madera. *Tecno ambiente: Revista profesional de tecnología y equipamiento de ingeniería ambiental*, 23(236), 16-18.
- Boada, L. E. A., & Vargas, F. E. S. (2015). Caracterización físico-química de pellets producidos a partir de mezclas 50/50 carbón bituminoso/madera residual. *Informador técnico*, 79(1), 18-25.
- Chamorro Sangoquiza, D. C. (2012). Construcción de una máquina secadora de pellets de balanceado.
- FAO (2014) Bioenergía y seguridad alimentaria evaluación rápida (BEFS RA) Manual de Usuario briquetas
- Fernández, J. (2003). Energía de la biomasa. *Energías renovables para el desarrollo. Thomson-Paraninfo*.
- Fernández-Linares, L. C., Montiel-Montoya, J., Millán-Oropeza, A., & Badillo-Corona, J. A. (2012). Producción de biocombustibles a partir de microalgas. *Ra Ximhai*, 8(3), 101-115.
- Fernández-Puratich, H., Oliver-Villanueva, J. V., Valiente, M., Verdú, S., & Albert, N. (2014). Desarrollo de pellets a partir de tres especies leñosas bajo condiciones mediterráneas. *Madera y bosques*, 20(3), 97-111.
- García-Reyes, M., Beltrán-Hernández, R. I., Vázquez-Rodríguez, G. A., Coronel-Olivares, C., Medina-Moreno, S. A., Juárez-Santillán, L. F., & Lucho-Constantino, C. A. (2017). Formation, morphology and biotechnological applications of

- filamentous fungal pellets: a review. *Revista mexicana de ingeniería química*, 16(3), 703-720.
- Gómez, J. M. (2016). Análisis de la variación de la eficiencia en la producción de biocombustibles en América Latina. *Estudios gerenciales*, 32(139), 120-126.
- Guillén, R. V., & Dávila, J. P. (2014). Aprovechamiento sostenible de los residuos forestales para la producción de pellets de biomasa leñosa torrefactada. *Saber y Hacer*, 1(2), 88-123.
- Jorge, S. I. L. V. A. (2019). Energía renovable en México: Retos y oportunidades. *Revista ESPACIOS*, 40(25).
- Mantulak-Stachukl, M. J., Hernández-PérezII, G., & Michalus-JuszczyszynI, J. C. (2013). Gestión estratégica de recursos tecnológicos en pequeños aserraderos. *Ingeniería Industrial*, 34(3), 328-339.
- Montoya, J. M. (2010). Potencial y riesgo ambiental de los bioenergéticos en México. *Ra Ximhai: revista científica de sociedad, cultura y desarrollo sostenible*, 6(1), 57-62.
- Moreno-López, M., Martín-Domínguez, I. R., & Alarcón-Herrera, M. T. (2011). Pellets de desechos madereros: Un combustible alternativo viable en México.
- Núñez, C. A. F., Fajardo, C. A. G., & Vargas, F. E. S. (2012). Producción y uso de pellets de biomasa para la generación de energía térmica: una revisión a los modelos del proceso de gasificación. *ITECKNE: Innovación e Investigación en Ingeniería*, 9(1), 21-30.

- Prado, J. B., Gostuski, L., Mosteiro, M. L., Rodríguez Padilla, M. L., & Crosta Blanco, P. (2017). Instalación de una planta de pellets de madera.
- Ramos, F. D., Díaz, M. S., & Villar, M. A. (2016). Biocombustibles.
- Serna, F., Barrera, L., & Montiel, H. (2011). Impacto social y económico en el uso de biocombustibles. *Journal of technology management & innovation*, 6(1), 100-114.
- Tenorio, C., Moya, R., Valaert, J., & Tomazello-Filho, M. (2016). Potencial de fabricación de pellets de residuos forestales de *Cupressus lusitanica* y *Tectona grandis* en Costa Rica. *Revista Tecnología en Marcha*, 29(2), 95-109.
- Torres, C., Chaves, M., Urvina, L., & Moya, R. (2018). Evaluación de la incidencia de pellets y astillas de madera en el desempeño de un gasificador tipo “downdraft”. *Revista Forestal Mesoamericana Kurú*, 15, 25-36.

## **Anexo 1. Técnicas de elaboración de biocombustibles**

La densificación de la biomasa es una de las posibilidades para la obtención de productos combustibles con un alto poder calorífico y que sean homogéneos tanto en propiedades como en dimensiones. La densificación de biomasa o peletización es un proceso de aplicación de una fuerza mecánica a los residuos de biomasa, como aserrín o astillas, para compactarlos en partículas sólidas de tamaño uniforme, tales como pellets, briquetas y troncos. Los objetivos de la densificación de la biomasa son: aumentar la densidad volumétrica de (40 - 200) kg/m<sup>3</sup> a una final de (600 - 1400) kg/m<sup>3</sup>, para facilitar el almacenamiento, la manipulación, el costo de transporte, y para disminuir el contenido de humedad (Torres et al., 2018).

Entre las propiedades que se evalúan están el contenido de humedad, el contenido de Carbono, el poder calorífico y la densidad. Estos determinan el uso y la aplicación real que se le puede dar a determinado tipo de biomasa. Una característica que determina la capacidad de aprovechamiento energético que a mayor densidad y mayor poder calorífico la sustancia representa mucha más energía por volumen ocupado (Forero Núñez et al., 2012). Por ejemplo, es posible ver como muchos de los distintos residuos agrícolas presentan valores en el poder calorífico cercanos, entre 13 y 19 MJ/Kg, sin embargo, los pellets ofrecen valores un poco más elevados (20 MJ/Kg) (Forero Núñez et al., 2012).

El proceso de producción de pellets pasa a través de una serie de etapas en las cuales la materia prima es tratada de tal forma que se compacta y se obtiene un material densificado. La primera etapa es la molienda con la cual se obtiene material de un tamaño homogéneo, posteriormente se seca el material y se procede a retirar los

elementos no deseados como metales con el uso de imanes. Una vez el material cumple estas etapas se humedece y se prensa en una máquina peletizadora, para posteriormente disminuir la temperatura y aumentar la dureza del sólido (Forero Núñez et al., 2012).



Figura 10. Tamizado de la materia prima según su tamaño (Escobar Ernesto Weil P, 2018).



Figura 11. Prensa pelletera (Escobar Ernesto Weil P, 2018).

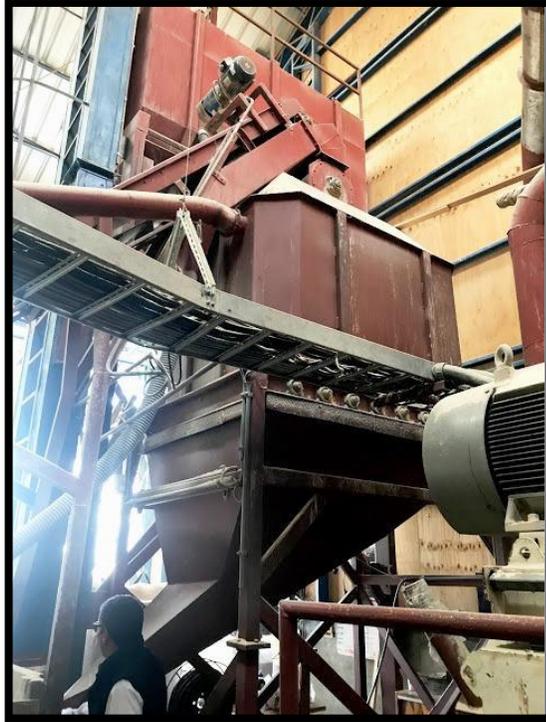


Figura 12. Equipo enfriador de pelletes (Escobar Ernesto Weil P, 2018).

La etapa de secado es una de las más críticas, debido al gran gasto energético que requiere y a los cambios en la composición que esta llega a producir. Procesos de secado con altos tiempos de residencia afectan a la cantidad de material presente en el pellet, promueve la evaporación de terpenos, disminución del poder calorífico final del producto así mismo, el uso de sistemas de recirculación de gases en la etapa del secado mejora la eficiencia del proceso haciéndolo más rentable puesto que disminuye la cantidad total de energía requerida (Forero Núñez et al., 2012).



Figura 13. Pellets siendo envasados al final del procedimiento (Escobar Ernesto Weil P, 2018).

Desde 1948 se han realizado estudios y desarrollados procesos de elaboración con enfoque de esta etapa, usando agentes aglomerantes como ceras y sustancias de lignosulfonato. Parte de los estudios tienen un consenso que tiene la lignina en las propiedades de dureza y resistencia del material sólido, en el comportamiento de distintos tipos de biomasa con los cambios de presión y la facilidad de comprimirlos (Forero Núñez et al., 2012).

Para aprovechar el potencial energético que poseen la biomasa y los pellets son varios los procesos que se pueden llevar a cabo, entre estos se encuentran; biodigestión, pirólisis, gasificación y combustión. La biodigestión se basa principalmente en la descomposición de la biomasa por efectos de microorganismos en ausencia de oxígeno, de tal forma que se genera un gas conocido como Biogás compuesto principalmente de

Metano ( $\text{CH}_4$ ) y de Dióxido de Carbono ( $\text{CO}_2$ ) de alto valor energético para su uso en motores de combustión y turbinas de gas (Forero Núñez et al., 2012).

La pirolisis es el proceso de descomposición de la biomasa por efectos térmicos a temperaturas entre  $400^\circ$  y  $600^\circ$  K, en las cuales las grandes cadenas químicas de la biomasa se rompen y liberan material volátil y material condensable (alquitranes); además, dejan un sólido conocido como carbón tratado por pirolisis de mayor valor energético y útil para la producción de energía en procesos de gasificación o de combustión (Forero Núñez et al., 2012).

El proceso de combustión se basa en la relación entre la biomasa o los pellets en exceso de Oxígeno de tal forma que genera dióxido de carbono, agua y produciendo así una gran cantidad de energía, la cual se transfiere a un líquido bien sea vapor de agua para sistemas de generación de energía eléctrica. Con base en este proceso se lleva a cabo la mayor aplicación actual de los pellets, por la cual se genera energía térmica para el calentamiento de espacios; y es sobre este tema que muchos científicos han llevado a cabo estudios dirigidos a evaluar la cantidad de emisiones generadas, formación de escorias que deriven en problemas de taponamiento de los quemadores residenciales y la relación entre la ceniza producida con la composición de los pellets empleados (Forero Núñez et al., 2012).

El proceso de gasificación consiste en el uso de un agente oxidante, bien sea  $\text{O}_2$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{O}$  o Aire a temperaturas entre 750 y 1100 K para la generación de un gas conocido como gas de síntesis, compuesto principalmente por  $\text{H}_2$  y  $\text{CO}$ . Este gas debido a su composición posee un alto poder calorífico para su uso directo en sistemas de generación de energía eléctrica o como agente reactivo en procesos de síntesis de

productos químicos. Este proceso es en la actualidad muy empleado en la industria debido al valor agregado que posee este gas, a la eficiencia energética del proceso y al hecho de no generar mayores niveles de emisiones que los procesos tradicionales (Forero Núñez et al., 2012).

La etapa de gasificación de los pellets es un tema bastante estudiado, y donde surge un enorme interés debido a las múltiples variables que afectan el proceso y la calidad del producto final obtenido. Entre estas variables se encuentran el diseño del reactor, la temperatura del proceso, la presión del sistema, el agente oxidante utilizado y las propiedades fisicoquímicas de los pellets, así como su composición (Forero Núñez et al., 2012). Básicamente el proceso de gasificación consta de una etapa de secado, una etapa de pirólisis, una etapa de combustión y finalmente una etapa de reducción; motivo por el cual los investigadores que desean estudiar el comportamiento del proceso prefieren separar cada etapa y evaluarla independientemente. Sin embargo, debido a la poca experimentación que se ha desarrollado para los pellets es necesario utilizar las cinéticas reportadas para procesos similares que utilicen madera o carbón (Forero Núñez et al., 2012). En la caracterización de los pellets se toma como referencia la Norma Austriaca ÖNORM M7135, que estableció los criterios de evaluación de calidad en cuanto a producción, transporte, almacenamiento y consumo final; es una de las más antiguas, de mayor rigor y completas en este campo (Fernández-Puratich et al., 2014).

Durante la caracterización se determinan las propiedades físicas y químicas de los pellets, evaluando los siguientes factores:

- Dimensiones: Se determina la dimensión de los pellets medida de longitud y el diámetro de la muestra, estos parámetros deben estar entre 4mm y 10mm para las medidas del

diámetro, mientras que la longitud debe estar en parámetros menores a 5mm multiplicado por el diámetro. Las dimensiones que maneja la FAO determinan que debe estar entre 6mm y 8mm.

- Densidad a granel: El volumen y el peso de un pellet se miden para determinar la densidad a granel, el peso se usa una balanza calibrada con una precisión de 0,001 gramo, y para el volumen se usa una probeta. Los parámetros deben estar por debajo de 1,12 kg/m<sup>3</sup>.

- Contenido de agua: El contenido de agua se calcula pesando la muestra de combustible (cerca de 100 g), antes y después de secarse a 105 °C de acuerdo con la norma ÖNORM G 1074. C.H. = ((Peso Húmedo - Peso seco) / Peso Húmedo) \*100%. La humedad debe estar por debajo al 10% de la masa total, de igual forma la FAO determina que no debe exceder el 10% de humedad.

- Contenido de ceniza: El contenido de ceniza se mide por la pérdida de ignición de una muestra a 550 °C el resultado final; las cenizas no deben superar al 0.5% o el 0.7% de la masa total en algunos casos.

- Poder calorífico: El poder calorífico de la muestra se calcula en una bomba calorimétrica y debe presentar más de 16,9 MJ/kg.

- Resistencia al impacto: Las muestras se dejan caer 4 veces desde una altura igual a 1,85 m a una placa de metal. El peso retenido por las muestras se considera la resistencia de las muestras de acuerdo a la NORMA ASTM D440-86.

- Resistencia al agua: Es una prueba de resistencia al agua que al momento no es normalizada pero también funciona para determinar la calidad de un pellet. Cada muestra

se sumerge en agua a 27°C durante 30 segundos, el valor de la resistencia se toma como el porcentaje en peso de agua absorbida por la muestra. Esta prueba es parte del procedimiento de la American Society of Agricultural Engineers.

- Resistencia a la compresión o resistencia al aplastamiento: Se refiere a la carga máxima que un pellet puede soportar antes de agrietarse o romperse. Se determina con una prueba de compresión diametral. Los pellets se colocan entre dos placas planas, se aplica un aumento de carga a una tasa constante de 5 N/segundo hasta que el pellet refleje agrietamiento o su ruptura completa. La carga de rotura se lee en la curva de tensión-deformación registrada, la cual es la resistencia a la compresión, y se reporta como la fuerza o el esfuerzo máximo que resiste el producto.

- Análisis Inmediato: En este conjunto de ensayos se determinan los porcentajes de humedad, cenizas, materia volátil y carbono fijo.

- Análisis elemental: Es una técnica que proporciona el contenido total de carbono, hidrógeno, nitrógeno y azufre de una muestra de materiales sólidos o líquidos. La técnica se basa en la completa e instantánea oxidación de la muestra mediante una combustión con oxígeno puro a una temperatura aproximada de 1000°C (Fernández-Puratich et al., 2014).

Entre las tecnologías que permiten una producción precisa en relación al volumen de la materia prima disponible se encuentra el tornillo de prensa mecanizado, la FAO establece tres parámetros para su utilización: 40, 400 y 3000 kg por hora. En cuanto a la producción manual de briquetas se establece 4 kg por hora, se utiliza cuando se trabaja a capacidades de producción a pequeña escala. La tecnología consiste en diseños

simples de fácil construcción como el extrusor de tornillo accionado a mano, prensa briqueteadora de palanca, prensa briqueteadora car Jack, etc. Estas herramientas funcionan para jornadas de producción que dependen de volúmenes específicos de materia prima y optimizar el tiempo (FAO, 2014).

#### Tipos, procesos y tecnologías de biocombustibles

Los biocombustibles no se limitan a los pellets y briquetas, pues estos tampoco figuran como un porcentaje mayor en cuanto al consumo de los biocombustibles en general los tipos de biocombustibles líquidos más utilizados en Latinoamérica corresponden a los llamados biodiésel y bioetanol, por sus bondades en los costos de fabricación y utilidad para las regiones emergentes marginales. Con relación al bioetanol, este puede ser de primera o de segunda generación; para este último, su producción se realiza con la incorporación de nuevos procesos de investigación y desarrollo (I+D), con la obtención de compuestos de plantas como la lignina, la celulosa o hemicelulosa, entre otros procesos tecnológicos utilizados, como la hidrólisis enzimática (Gómez, 2016).

La clasificación de biocombustibles más difundida es categorizándolos por sus funciones y no por su composición química, esto debido a que de esta última forma no varía mucho. Así, se habla de biocombustibles de primera generación para designar a los que se producen a partir de aceites y azúcares comestibles. Los biocombustibles de segunda generación se obtienen con materias primas no aprovechables para alimentación humana, como residuos forestales y agrícolas, que tienen elevado contenido de celulosa y lignina, principales componentes de las paredes celulares de las plantas (Ramos et al., 2016).

Por su parte, la producción de biodiésel de segunda generación también incorpora novedosas tecnologías para su obtención y se deriva de biomásas distintas a las oleaginosas, como la madera, la paja y residuos orgánicos, mediante procesos de gasificación Fischer-Tropsch, que permiten sintetizar combustibles líquidos de alta calidad (Gómez, 2016).

La torrefacción es una operación termoquímica a la que se somete a la biomasa a temperaturas variables entre 200 °C y 300 °C en condiciones atmosféricas y en un ambiente ausente de oxígeno. Adicionalmente, se caracteriza por bajas velocidades de calentamiento para alcanzar la temperatura de torrefacción (menores a 50°C/min). Es reconocida como un método que es técnica y económicamente viable para la conversión de biomasa leñosa en un biocombustible de alta densidad energética, hidrófobo, compactible, triturable y con una menor relación oxígeno carbono. Todas estas propiedades facilitan su transporte, manipulación, almacenamiento a largo plazo y combustión orientada a suplir necesidades energéticas rurales, urbanas e industriales (Guillén & Dávila, 2014). La torrefacción es una operación actualmente estudiada por el Energy Research Centre of the Netherlands (ECN), el Centro Nacional de Energías Renovables - Gobierno Navarra (CENER), Andritz y Sector Project (Solid Sustainable Energy Carriers by Means of Torrefaction)

El producto resultante de la torrefacción presenta mejores propiedades como biocombustible de madera: mayor poder calorífico, más hidrófobo en comparación con la biomasa sin torrefactar, menos resistencia a la molienda y ausencia de desarrollo de actividad microbiana capaz de degradarlo. Se observa que la biomasa torrefactada puede llegar a contener el 90 % de la energía inicial en el 70 % de la masa inicial. Como

resultado obtenemos un producto con una mayor capacidad energética en los primeros porcentajes consumidos, dándole mayor dinamismo al producto de los biocombustibles de biomasa leñosa (Guillén & Dávila, 2014).

Dadas las singularidades del proceso productivo, la operación y mantenimiento especializado de los equipos que componen una planta de pellets de madera es fundamental para la viabilidad de las instalaciones y garantizar la calidad del pellet producido. De esta forma se maximiza el rendimiento de la instalación, disminuyendo las paradas productivas, optimizando las operaciones de mantenimiento y gestionando correctamente el abastecimiento de consumibles y repuestos (Alonso, 2013).

Como punto clave para el éxito de una planta de pellets, está disponer del personal en planta suficientemente capacitado y experimentado para gestionar correctamente la instalación. Así mismo, es necesario disponer del soporte adecuado para el control y planificación del abastecimiento de repuestos y consumibles, así como para el abastecimiento de materia prima y la comercialización final de los pellets, controlando mercados nacionales e internacionales (Alonso, 2013).

Ubicación de la planta, materias primas y dimensión de los equipos son características que varían en cada planta y, por ello, no existe una receta única para la operación y el mantenimiento de estas instalaciones; es necesario realizar una planificación detallada y específica para cada proyecto y así dar la mejor de las soluciones en cada caso. Smart Operations nace de la mano de Prodesa para dar soluciones integrales y singulares a cada instalación (Alonso, 2013).

Anexo 2. Formato de las encuestas de residuos forestales.

Actividad económica:\_\_\_\_\_

Domicilio\_\_\_\_\_Entrevistador\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_ Fecha\_\_\_\_\_

Líder del negocio: A) Padre/Madre\_\_ B) Abuelo/a\_\_ C) Hijo/s\_\_ D)Otro\_\_

¿Especies con las que trabajan?

Tipo de residuos que generan: A) Astillas\_\_ B) Viruta C) Aserrín\_\_ D) Trocería\_\_ E)

Tablas\_\_ F) Rodajas G) Ramas\_\_

¿Cantidad de residuo generado por especie por semana?

¿Cuál es la disposición de los residuos?

¿Venden los residuos? Si es así, ¿Cuál es el precio de venta?

¿Cuál es la época de mayor producción de residuos?

¿Qué usos se les pueden dar a los residuos?

¿Qué problemas generan los residuos en el sitio de trabajo?