

INFORME FINAL DEL PROYECTO:

# CARBONIZACIÓN DE BIOMASA PARA ENERGÍA RENOVABLE, BIOCARBÓN EN SUELOS Y SECUESTRO PERMANENTE DE CARBONO.

INSTITUTO TECNOLÓGICO DE COSTA RICA

VICERRECTORÍA DE INVESTIGACIÓN

Propuesta presentada en noviembre 2010.

Ejecución del proyecto: 2011 y 2012.

Informe final: presentado inicialmente en abril 2013, aprobación en consejo de escuela en octubre 2013, entrega en abril 2014.

Autor: Jaime Quesada, Escuela de Química, [jaime.itcr@gmail.com](mailto:jaime.itcr@gmail.com).



<b>CONTENIDOS</b>	<b>página</b>
Resumen y palabras claves	4
Introducción	5
Metodología	9
Resultados	14
Discusión	19
Conclusiones	24
Recomendaciones	25
Agradecimientos	26
Fuentes bibliográficas	26
Apéndices	30

CARBONIZACIÓN DE BIOMASA PARA ENERGÍA RENOVABLE, BIOCARBÓN EN SUELOS Y SECUESTRO PERMANENTE DE CARBONO.

Propuesta presentada en noviembre 2010.

Ejecución del proyecto: 2011 y 2012.

Informe final: presentado inicialmente en abril 2013, aprobación en consejo de escuela en octubre 2013, entrega en abril 2014.

Autor: Jaime Quesada, Escuela de Química, [jaime.itcr@gmail.com](mailto:jaime.itcr@gmail.com).

Participantes:

<b>Participante</b>	<b>Período</b>	<b>Jornada semanal</b>
COORDINACIÓN: Dr. Jaime F. Quesada-Kimzey.	Año 2011	12 H
	IS-2012	4 H
Lic. Laura Hernández Alpizar	IS-2012	8 H

## Resumen

El objetivo general fue elaborar un conjunto tecnológico funcional para la valorización de residuos biomásicos mediante la carbonización en escala intermedia. Se colaboró con la empresa COOPETARRAZÚ. Se adquirió equipo chino consistente en molino de martillos (4 kW, 150 kg/hora), un secador (a leña y motor de 4 kW, 150 kg/hora), un extrusor de briquetas (16 kW, 200 kg/hora), y un horno para carbonizar (3 m<sup>3</sup> de volumen interno). Una vez que la empresa designó el espacio, se procedió a instalar estos equipos y a ponerlos a funcionar. Con la broza provista por la empresa, se hicieron pruebas diversas de secado, molienda, briqueteado y carbonización. Se diseñó e implementó un procedimiento de laboratorio para estimar el rendimiento esperable de carbón de un material. El carbón obtenido de la broza en el laboratorio, demostró contener menos de 15% de la energía del material original, con lo cual resultan preferibles otras vías de valorización energética. La alta proporción de materia y energía perdidas durante la carbonización en forma de gases combustibles resulta una seria desventaja. La combustión directa fue excelente en el horno, pero la emisión de humo mayor que con leña hizo imposible su uso en las condiciones actuales de los equipos de la empresa. Las principales recomendaciones prácticas son desarrollar e implementar un método de secado para la broza, usar la broza briquetada en combustión directa, y modificar el equipo de combustión y de control de emisiones para poder usar esa broza como fuente de energía.

Palabras claves: Biomasa residual, biocarbón, bioenergía, valorización, carbonización, café, broza.

# Introducción

Este proyecto se enfocó en la carbonización de residuos biomásicos de actividades agroindustriales, como una opción para su valorización. La valorización de residuos tiene una serie de efectos positivos para la sociedad en que ocurre, entre los cuales se cuentan la generación de empleo, la generación de productos de valor, la compensación de los costos de manejo del residuo, y la evitación de riesgos considerables de contaminación por mal manejo del residuo. En el caso de los residuos biomásicos, el aprovechamiento energético representa una vía de valorización bastante accesible que puede absorber los volúmenes que se generan, características estas dos que no siempre coinciden en otras vías de valorización, como por ejemplo la fabricación de bebidas y vinos a partir de la broza del café.

La biomasa representa una fuente de energía C-neutral, dado que no incorpora carbono fósil al ciclo biogeoquímico. Su combustión suele ser menos contaminante que la de combustibles fósiles en aspectos específicos, como la emisión de dióxido de azufre y de hollín. En el caso de Costa Rica, la energía contenida en la biomasa de residuos de procesos agroindustriales actualmente existentes en el país es del orden de magnitud de aquella energía que se importa en forma de combustibles fósiles (Ramírez y Roldán, 2007). La factura petrolera anual supera hace varios años los \$2000 millones (RECOPE, Boletín No 27 del 18 de abril del 2008). Sustituir tan solo un tercio de ella tendría enormes implicaciones de orden económico, social y ambiental, por la sustitución de combustibles más contaminantes, porque el manejo adecuado de los residuos, cosa que actualmente no siempre ocurre, por la generación de empleo, y por la reducción de costos de manejo de los residuos que tendría lugar en muchos casos.

En las actividades agroindustriales son comunes los residuos biomásicos que representan problemas de manejo, con costos considerables para las empresas. Los residuos de la actividad del beneficiado del café durante años contaminaron nuestros ríos, dejándolos convertidos en cloacas malolientes durante una parte del año, y dañando sus ecosistemas. Luego de esfuerzos que al sector le han costado más de cien millones de dólares ([http://www.icafe.go.cr/nuestro\\_cafe/mejor\\_cafe/medio\\_ambiente.html](http://www.icafe.go.cr/nuestro_cafe/mejor_cafe/medio_ambiente.html), consultado en mayo 2013), se ha logrado un manejo considerablemente mejor de los residuos de la actividad en Costa Rica. Sin embargo,

aún no se ha llegado a la valorización de los residuos, por lo que darles manejo adecuado aún representa un gran reto económico y de otras índoles para la industria cafetalera. En este contexto, tiene mucho sentido explorar opciones para la valorización energética, pues esta vía puede absorber la totalidad de los residuos, esencialmente resolviendo el tema.

La carbonización de residuos biomásicos puede formar parte de la vía de valorización energética, y desembocar en la misma, o en la generación de otros productos de mayor valor agregado. El carbón de biomasa, o biocarbón, puede ser utilizado como un biocombustible mejorado, como carbón activado o catalítico, o como enmienda de suelos, siendo esas tres opciones capaces de absorber la totalidad del producto (McHenry 2009, Xiangfeng y colab. 1995, Antal y Gronli 2003; Woolf y colab. 2010; Lehmann y colab. 2007).

Como combustible, el biocarbón resulta generalmente mejor que la biomasa original por varias razones, de las cuales tres son que no produce humo al quemar, que no se pudre, y que generalmente tiene mayor contenido calórico. El biocarbón es útil como fuente de energía en la industria y en el ámbito doméstico. Históricamente, la carbonización se ha enfocado en la producción de carbón a partir de madera (Antal y Gronli, 2003), y no ha sido sino recientemente que ha enfocado otros materiales biomásicos. Este nuevo enfoque es consecuencia de la creciente tendencia mundial a la valorización energética de residuos biomásicos generados por actividades agroindustriales y agroforestales, impulsada por intereses ambientalistas y también económicos, y favorecida por la proliferación de pequeñas empresas fabricantes de maquinaria de bajo costo para el propósito y de iniciativas que han tendido a promoverla. Basta con hacer una búsqueda de Google de las palabras “charcoal biomass machinery” para comprobar la oferta disponible, y de “biomass energy” para encontrar los sitios de un número de iniciativas. La carbonización de los residuos biomásicos ha sido una de las opciones cuya accesibilidad se ha favorecido gracias a estos desarrollos.

Concomitantemente, se han generado una variedad de iniciativas tendientes a impulsar la producción de carbón a partir de residuos biomásicos con métodos simples y accesibles a familias de bajos recursos ([www.greenempowerment.org](http://www.greenempowerment.org), [practicalaction.org/fuel-from-the-fields-charcoal-from-agricultural-waste](http://practicalaction.org/fuel-from-the-fields-charcoal-from-agricultural-waste), arti-

africa.org/projects/waste-to-wealth, etc.) para su utilización en la cocina, en países en los que la biomasa sigue siendo uno de los combustibles más relevantes para este propósito (Kammen y Lew 2005). La sustitución de combustibles biomásicos que producen humo al quemarse, por carbón (que no lo produce), es un desarrollo de gran interés para la salud pública en muchos países del mundo, dentro de los cuales aún podemos contar el nuestro. En gran parte de África, el carbón ya constituye uno de los principales combustibles utilizados en la cocina (Kammen y Lew 2005), pero su obtención se da principalmente a partir de madera de bosques y por métodos inadecuados, contribuyendo a la deforestación y a la contaminación atmosférica, a tal punto que ha sido considerado como la peor opción de combustible de todas las disponibles, incluyendo combustibles fósiles, desde una perspectiva ambiental (Kammen y Lew 2005). En África, los usuarios del carbón para la cocina son generalmente familias de escasos recursos, y el costo del carbón representa una parte importante de su presupuesto (ídem). Las familias en las que se cocina utilizando combustibles biomásicos, como la boñiga seca de bovinos y los residuos de cultivos, igualmente son de bajos ingresos, y la exposición al humo empeora su situación. La carbonización de biomasa residual ha cobrado en este contexto gran interés, dado que es una potencial fuente de ingresos para esas familias y a la vez les permite reducir su exposición al humo.

El biocarbón como mejorador de suelos es de gran interés desde las perspectivas agrícola y ambiental (McHenry 2009, Woolf y colaboradores 2010; Lehmann y colab. 2007, Lehmann 2006, Laird 2008, Lehmann y colab. 2003), por varias razones: a) tiene gran persistencia (siglos o milenios), con lo que equivale a fosilizar el carbono sacándolo del ciclo biogeoquímico y resulta C-negativo, b) mejora las características físicas del suelo en forma similar a la materia orgánica, y c) retiene y hace disponibles nutrientes y agua en el suelo, incluido el fósforo (algo que no logra la materia orgánica). Algunas ventajas de su empleo son que: a) el suelo se hace más esponjoso y mantiene la humedad por más tiempo, b) proliferan microorganismos benéficos del suelo y por lo tanto se incrementa su salud, c) se reducen los requerimientos de fertilización y con ello los costos económicos y ambientales de la producción agrícola, d) se reduce la lixiviación de nutrientes y con ello la contaminación de cuerpos de agua y de aguas subterráneas, y e) se secuestra carbono del ciclo biogeoquímico por siglos y hace aumentar la biomasa en el suelo después de su aplicación, cosa que secuestra carbono



adicional del ciclo. Proliferan cada vez más los reportes de logros significativos en aumentos de productividad, reducción de insumos agrícolas, como fertilizantes y plaguicidas (Chan y colab. 2007; Oguntunde y colab. 2004; Major y colab. 2010), a raíz de la incorporación de carbón obtenido a partir de los residuos de los cultivos.

Este proyecto se enfocó en la broza del café, como resultado del proceso de selección de residuos relevantes de la actividad cafetalera, tal como se detalla más adelante. El problema del manejo de la broza puede verse resuelto en su totalidad por la vía de valorización energética, que es capaz de absorber todo el volumen y eliminar los costos asociados al manejo del material como un desecho. Existe una variedad de trabajos que consideran la valorización energética de la broza del café (Suárez y colab. 2003 y 2003a, Rodríguez y Gordillo 2011, Sileshi y colab. 2013), aunque a menudo no como tema central. Algunos de estos trabajos proponen la densificación de la broza para la combustión directa (por ejemplo los de Suárez), cosa que con frecuencia lleva implícita la venta del material a otro usuario, y de hecho esta es la propuesta que se halla en la estrategia de mercadeo de los fabricantes de maquinaria que se anuncian en internet.

En algunos trabajos encontrados se propone la gasificación de la broza para generación de calor del proceso de beneficiado (Rodríguez y Gordillo 2011, Lugano y colab. 2010; Sileshi y colab. 2013). Los trabajos realizados por ICAFE en valorización energética (Costa Rica) lamentablemente solo se lograron encontrar en la revista informativa del ente, con bajo nivel de detalle, en concordancia con el carácter de la publicación. Entre ellos, son notorios los de Rolando Chacón y Emmanuel Montero , enfocados en la gasificación de la broza (Montero 2008, Chacón 2007). Se halló un trabajo enfocado directamente en la generación de electricidad utilizando broza (Gangaputra 2013), mas solamente como un análisis de la factibilidad, igual que se podría hacer para cualquier otro residuo biomásico con buen contenido calórico como la broza. Enfocado directamente la carbonización de la broza del café, se halló un único trabajo (Pallavi y colab. 2013), en el que se aborda la carbonización de la broza del café desde una tecnología simple y muy accesible a familias de escasos recursos, mas no desde una perspectiva de valorización industrial. Este proyecto se concentra en la carbonización de la broza desde una perspectiva industrial, con lo cual el proyecto reviste relevancia y representa un aporte en un área poco explorada.

Este proyecto se concibió dentro del marco institucional llamado “1% del FEES”, con la visión de elaborar un conjunto tecnológico funcional para la valorización de residuos biomásicos mediante la carbonización en escala intermedia o piloto, es decir, no en la escala de laboratorio, aunque tampoco en escala industrial. Este conjunto de maquinaria, herramientas e instrumentos quedaría disponible para que, en el TEC, se pudiese evaluar la valorización de materiales biomásicos residuales por las vías del uso energético y la utilización del carbón con otros propósitos. La escala intermedia resulta necesaria para preparar las cantidades de material requeridas para su evaluación en el sitio de uso real; en el caso presente, en la planta de beneficiado y en los cultivos. Los usos más prácticos para el producto carbonoso, en el contexto específico de la industria cafetalera, se visualizaron en la obtención de energía renovable y en la enmienda de suelos. El TEC podrá aprovechar su capacidad instalada también para generar biocarbón a partir de sus propios residuos biomásicos, el cual se podrá utilizar internamente o bien comercializar. Con este proyecto el TEC hace valer su compromiso con el ambiente y el desarrollo de energías renovables.

En el caso específico del beneficiario externo, COOPETARRAZÚ, se previó la evaluación de algunos de sus principales residuos en ambos usos (energía, mejoramiento de suelos). Los residuos más problemáticos del beneficiado del café son la broza (pulpa) y las aguamieles (agua con mucílago) producto del despulpado del grano de café. Anualmente se procesan en COOPETARRAZÚ unas doscientas cincuenta mil fanegas de café, con picos de hasta tres mil quinientas fanegas por día. Con ello se producen veinticinco mil toneladas métricas anuales de broza residual y cincuenta mil metros cúbicos de aguamieles.

Los objetivos de este proyecto (ver detalle en el apéndice) estuvieron enfocados en evaluar la carbonización de los residuos más relevantes de la actividad cafetalera y probar el biocarbón obtenido en su uso energético y en su uso como enmienda de suelos. Para la determinación de cuáles eran los residuos de mayor relevancia dentro de la actividad cafetalera, se recurrió a entrevistar a expertos del sector. Se adquirieron e instalaron los equipos que permitieran la obtención de carbón a partir de estos residuos. En el diseño experimental de este proyecto, se consideró solamente la obtención de carbón para realizar pruebas de su utilización en la planta de beneficiado y en el suelo, es decir, solo se consideró una escala semi-industrial, con la cual se pudieran realizar pruebas en los procesos productivos, propósito para el cual se

adquirió la maquinaria adecuada. Los respectivos ensayos se realizaron, pero como se verá adelante, la obtención de carbón a partir de la broza dio resultados inesperados. A raíz de estos resultados, se realizaron pruebas de laboratorio complementarias que permitieron comprender lo que se observaba a una escala mayor, con lo cual se logró tomar decisiones estratégicas respecto a los objetivos del proyecto. A partir de estas decisiones, se sustituyeron las pruebas planeadas para el carbón de la broza, por pruebas de combustión directa, con la broza briqueteada no carbonizada, como fuente de energía. Adelante se detalla la información completa.

## Metodología

### Determinación de residuos más relevantes.

Para esta fase, se recurrió a entrevistar personas vinculadas al sector café y a los cuadros de mando de la empresa, en particular quienes estaban al tanto de las operaciones que se realizaban cotidianamente. Se determinaron los criterios relevantes, y se aplicaron a los residuos descritos. Los criterios fueron: impacto ambiental, costo del manejo adecuado y problematicidad percibida por la empresa (COOPETARRAZÚ).

### Muestras de broza.

La broza con la que se hicieron pruebas, fue suministrada por la empresa, luego de ser secada al sol en el patio de secado. El origen de esta broza fueron plantaciones la zona de San Marcos de Tarrazú. Provino de café recolectado en diciembre 2011 y diciembre 2012. Se utilizó broza de secado reciente en todas las pruebas. El secado se inició en los 5 días siguientes al chancado, es decir, a la generación del residuo.

### Equipo para procesar los residuos.

Se adquirieron equipos de escala intermedia detallados en el cuadro 1. Estos equipos fueron construidos por la empresa Leemay (Zhengzhou, Henan, China), y estuvieron disponibles en noviembre del 2011 en la planta “El Marqués” de Coopetarrazú.

Cuadro 1. Equipo de escala intermedia adquirido para este proyecto.

<b>EQUIPO</b>	<b>TIPO</b>	<b>MODELO</b>	<b>CAPACIDAD</b>	<b>CONSUMO/kW</b>
Molino	De martillos	CPFS-30	>150 kg / hora	4
Secador	Arrastre con aire caliente	HGJ-1	>200 kg / hora	4
Briqueteador	Extrusión en caliente	ZT-50	>150 kg / hora	21
Horno	Para carbonizar, 3 m <sup>3</sup>	THL-3	>500 kg / carga*	4 (máx.)*

\*Cada carga requiere entre 30 y 48 horas; el motor opera durante menos de 5 de esas horas.

La instalación y puesta en marcha de los equipos se completó en mayo 2012 en un espacio construido por COOPETARRAZÚ, y con la ayuda de sus técnicos. Dominar su funcionamiento requirió mucho aprendizaje a partir de experiencia, y algunas modificaciones menores en las que COOPETARRAZÚ prestó ayuda, y se logró completamente en septiembre del 2012.

#### Evaluación del briqueteado de la broza del café.

Se hicieron pruebas de briqueteado con broza tal como venía de los patios de secado, y con broza que se había sometido al proceso normal recomendado. El proceso normal recomendado es la molienda del residuo con su posterior pasaje por el secador. Se ensayó el briqueteado con el material aún caliente y con el material ya frío, y se obtuvieron resultados diferentes.

#### Evaluación de la carbonización de la broza del café en horno de escala intermedia.

Para evaluar la carbonización de la broza del café se hicieron ensayos de carbonización preliminares en el horno adquirido para el propósito, con broza en briqueta y con broza seca y suelta. La broza suelta o en briqueta se colocó dentro de cilindros de malla, de 40 cm de diámetro y 120 cm de altura, los cuales a su vez se colocaron dentro del horno. Se aplicó un programa de temperatura recomendado por la empresa fabricante, que se describe abajo.

El programa recomendado por la empresa fabricante consistió en encender el abanico con la hornilla de leña encendida, de modo que entraran los gases calientes de combustión al horno para calentarlo, y mantener esta situación hasta que la temperatura llegase a un límite preestablecido, momento en el cual se debía apagar el abanico y vigilar la temperatura. Cuando la temperatura bajase pronto llegando al mismo límite, se debía volver a encender el abanico. Esto debía repetirse algunas veces, hasta que la temperatura no tendiese a bajar prontamente después de apagado el abanico, sino a subir a cerca de 500°C. Al ocurrir esto, se debía cerrar la entrada de aire, y dejar el horno lo mejor sellado que se pudiese. Luego de unas 30 horas, la temperatura del horno debía bajar nuevamente a 38°C, temperatura adecuada para la descarga.

Este programa se siguió, utilizando como temperaturas límite las de 200°C y 300°C, tal como se describe en el apéndice. Se realizaron pruebas preliminares, a partir de las cuales se decidió realizar pruebas de laboratorio con el fin de poder interpretar las observaciones hechas en el horno grande.

#### Termogravimetría de la broza.

Se determinaron las temperaturas críticas para la pirólisis de la broza mediante una evaluación termogravimétrica según el método descrito por Castro y Costa (2007) y utilizado por Tenorio y Moya (2013) para evaluar características de combustión.

#### Evaluación de la carbonización de la broza del café en el laboratorio.

Se estableció un método para evaluar la carbonización de los materiales en el laboratorio. El método fue evaluado en cuanto a su repetibilidad aplicándolo a 2 materiales diferentes (raquis de palma y madera de ciprés), realizando más de 15 repeticiones en cada material, a fin de determinar la dispersión típica del método. El método consistió en envolver cantidades de entre 2 g y 10 g de material en papel aluminio, de modo que quedase sellado dentro de la envoltura. Se pesó cada paquete. El paquete se colocó en la mufla, la cual se encendió y llevó a 300°C. Se mantuvo a esa temperatura por 60 minutos o bien el tiempo necesario para que cesara la emisión de humo. Luego se elevó la temperatura a 500°C y se mantuvo durante 15 minutos. Después de esto se apagó el horno. Los paquetes fueron pesados después de alcanzar nuevamente la temperatura ambiente.

El diseño del método se basó en datos termogravimétricos experimentales propios, y en datos para materiales lignocelulósicos de Słopiecka y colaboradores (2011), que indican que la pirólisis de la hemicelulosa inicia cerca de los 275°C, mientras la celulosa y la lignina se descomponen aproximadamente a 350°C. También se consideraron las temperaturas de operación del horno de carbonización, tal como las recomendó la empresa fabricante.

#### Evaluación del carbón en usos de interés de la empresa.

Estas evaluaciones no se realizaron, como se explica más adelante en la discusión de resultados. Estaban previstas así:

Uso energético: en los hornos de la planta, bajo condiciones de trabajo normales.

Uso como mejorador de suelos: en terrenos de la cooperativa, con cultivos como plántulas de café y cultivos dendroenergéticos.

#### Evaluación del contenido calórico de los materiales.

El contenido o poder calórico de los materiales fue evaluado por el método estándar de ASTM D3175 – 11.

#### Evaluación del contenido de ceniza de la broza.

La ceniza de la broza fue evaluada por el método estándar oficial 942.05 de la AOAC.

# Resultados

La mayor parte del trabajo realizado en este proyecto, y por lo tanto de sus resultados, se realizó en torno a la adquisición, instalación y puesta en marcha de los equipos adquiridos para hacer las pruebas, y en torno a las pruebas preliminares con estos equipos. Los resultados y demás detalles de estas etapas se describen en el apéndice, ya que revisten poco interés científico, pero algunos pueden ser de gran utilidad práctica. La etapa de pruebas preliminares condujo a la toma de decisiones sobre los objetivos a cumplir, por lo cual algunos resultados de estas pruebas preliminares se describen en este apartado, en la medida en que explican esa toma de decisiones.

## RESIDUOS MÁS RELEVANTES

Los esfuerzos por determinar cuáles eran los residuos más relevantes para la empresa (objetivo 2) arrojaron los resultados que se detallan a continuación, que son informaciones recopiladas en diversas fuentes, principalmente de funcionarios de la empresa COOPETARRAZÚ.

Un primer resultado fue que los residuos biomásicos más relevantes de la actividad cafetalera son los que se originan en el proceso de beneficiado. El beneficiado del café es el proceso que convierte el fruto del café recién cosechado en el grano de café seco y descascarado, listo para tostar. Se determinó que el beneficiado es un proceso centralizado, donde se concentran las cosechas de los cafetales que cubren extensiones considerables, en la época de la cosecha de café, que en Costa Rica abarca desde septiembre hasta febrero y se concentra en diciembre y enero. Se determinó que en el beneficio se concentran los residuos, tanto en ubicación como en tiempo. Así, se determinó que los residuos del proceso de beneficiado son los más relevantes de la actividad cafetalera.

De los residuos del beneficiado, se determinó que los más relevantes son la broza, las aguamieles y la cascarilla (ver cuadro 2). La broza comprende el exocarpo (cáscara) y el mesocarpio del fruto, es decir, la cáscara del fruto con parte de la pulpa. Las aguamieles son un agua residual que contiene parte del mesocarpio de la fruta, que queda suspendido o disuelto en el agua usada como vehículo para la limpieza de la semilla. La cascarilla es la capa pergaminosa que recubre los cotiledones de la semilla

o grano de café, y es retirada del grano cuando ya ha sido secado; este es el último paso de preparación del café, previo al tostado. La relevancia de estos dos residuos reside en a) el potencial de impacto ambiental, b) los costos de manejo y c) su abundancia y consecuente dificultad de manejo.

Cuadro 2. Residuos más relevantes del beneficiado del café, según datos de COOPETARRAZÚ.

9,5 Fanegas de café generan aproximadamente:	
BROZA	1000 kg
AGUAMIEL	2000 kg
CASCARILLA	100 kg
COSTOS DE MANEJO	25 USD

El principal destino de la cascarilla en COOPETARRAZÚ es la combustión directa; genera calor para el secado del café. Este uso no ofrece mayores inconvenientes, debido a la fácil combustión del material, aunque produce más humo que la leña. El que la cascarilla esté seca representa una ventaja para su almacenaje, sobre todo si su uso es otro o no ocurre en el sitio. Su densidad aparente es de aproximadamente 0,35 kg/L. Representa un riesgo ambiental similar al implícito en los residuos agroforestales, al ser un material similar al aserrín seco.

La broza y las aguamieles, en cambio, representan un reto permanente, debido a su alto contenido de agua, a la rapidez con que se descomponen y generan olores, y a su potencial de impacto ambiental. La broza se maneja actualmente en mayor medida mediante métodos de compostaje, para convertirla en abono orgánico. Este es su principal destino en COOPETARRAZÚ, la empresa que colaboró esta investigación. Las aguamieles son un residuo líquido, cosa que impide su carbonización en seco.

Se determinó, por lo tanto, que los residuos más relevantes son la broza y las aguamieles. Solo la broza es susceptible de valorizar por el método de carbonización



contemplado en el proyecto. Se elaboró una propuesta de investigación para abordar el tema de las aguamieles en otro momento y con otra metodología. La empresa proveyó la broza, secada al sol en sus patios de secado durante la cosecha de 2012-2013.

## CARBONIZACIÓN DE LA BROZA

En el apéndice se hallan los detalles relativos al funcionamiento y desempeño de la maquinaria de molienda, secado, briqueteado y carbonización.

Se esperaba producir varias toneladas de carbón de broza, con las cuales se podrían realizar diversas pruebas, tanto de uso como ensayos de laboratorio. Las pruebas preliminares de carbonización de la broza, tanto en forma de briquetas como suelta, en el horno de carbonización, produjeron materiales con grados diversos de carbonización y combustión. Aquellos que estaban más carbonizados tenían proporciones altas de ceniza. Una parte de los materiales quedaron reducidos completamente a ceniza. Otros apenas se tostaron.

Dados estos resultados preliminares, se detuvo la experimentación en carbonización en el horno grande, para realizar pruebas de laboratorio que ayudaran a comprender lo que ocurría y orientar mejor el trabajo subsecuente.

La termogravimetría de la broza reveló que a partir de aproximadamente 300°C se presentaba un ritmo de pirólisis mayor en la broza, como lo muestra la figura 1 a continuación. Estos resultados, junto con datos de otras fuentes ya mencionadas en la metodología, se usaron para definir las temperaturas para establecer el método de evaluación del rendimiento de carbón, o método de carbonización. Como lo muestra la figura 1, partir de aproximadamente 370°C se presentaron inflamaciones de los gases durante la medición de temperatura, las cuales hicieron las mediciones más difíciles y menos confiables.

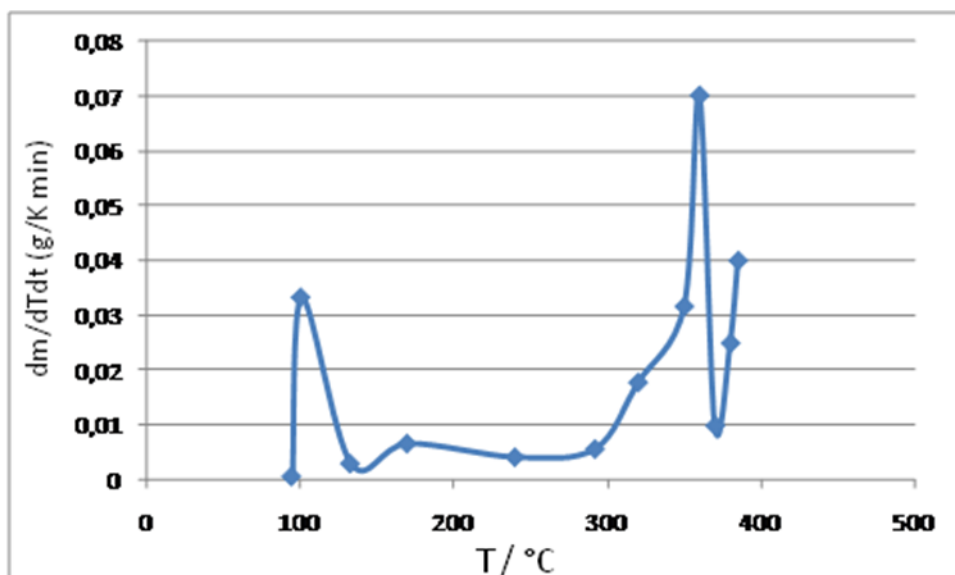


Figura 1. Termogravimetría de muestra de broza.

Se diseñó e implementó un ensayo de carbonización que permitiese hacer un estimado del rendimiento de carbón esperable de un material, al carbonizarlo. Se valoró la repetibilidad del ensayo en dos materiales de especies muy diferentes entre sí, el ciprés y la palma aceitera. El resumen de los resultados de este ensayo se presenta en el cuadro 3. Se obtuvieron coeficientes de variación menores a 3% en ambos casos, con números de ensayos mayores a 15.

Cuadro 3. Variabilidad para el método de carbonización.

	RAQUIS PALMA	MADERA CIPRÉS
PROMEDIO	26,5 %Carbón	26,2 %Carbón
DESVIACIÓN ESTÁNDAR	0,68 %Carbón	0,55 %Carbón
COEFICIENTE DE VARIACIÓN %	2,5%	2,1%
N	18	17

Se procedió a aplicar el método a la broza, con el fin de estimar su rendimiento de carbón. Se evaluaron los contenidos calóricos de la broza y su carbón, y las de otros materiales relacionados. Los resultados de las pruebas se muestran en el cuadro 4. En las condiciones del ensayo, la broza se carbonizó de manera reproducible, con un rendimiento de carbón muy repetible.

Cuadro 4. Resultados de las pruebas de laboratorio en la broza y otros materiales relacionados.

PRUEBA	RESULTADO PROMEDIO	DESVIACIÓN ESTÁNDAR	COEFICIENTE DE VARIACIÓN
Carbonización de broza suelta (% rendimiento) *	27,2	0,7	2,6%
Carbonización broza en briqueta (% rendimiento) *	30,1	0,7	2,2%
Ceniza broza (%)*	11,8	0,2	1,7%
Humedad de broza (%)**	16,2	0,55	3,4%
Contenido calórico de broza (MJ/kg)*	16,9	0,33	2,0%
Contenido calórico de briquetas de broza (MJ/kg)*	10,3	0,03	0,3%
Contenido calórico de los carbones de broza de briqueta y suelta (MJ/kg)	8,0	0,12	1,5%
Contenido calórico leña de ciprés secada al sol (MJ/kg)*	16,6	0,04	0,2%
Contenido calórico carbón de leña de ciprés (MJ/kg)*	43,4	0,95	2,2%
Carbonización leña de ciprés (% rendimiento) *	25,5	0,17	0,7%
Contenido calórico leña de eucalipto secada al sol (MJ/kg)*	17,1	0,15	0,9%
Contenido calórico carbón de leña de eucalipto (MJ/kg)*	29,4	0,87	3,0%
Carbonización leña de eucalipto (% rendimiento) *	26	1,97	7,6%

\* material secado al sol, expuesto al ambiente \*\* secado convencional en horno

La humedad de la broza seca expuesta al ambiente fue de 16,2%, según el método convencional de secado en horno (105°C durante 20 horas). Durante su secado, la broza emite gases diferentes del vapor de agua, que se evidencian por el olor intenso durante toda la operación. El contenido calórico del carbón de la broza fue igual en el

carbón obtenido de la broza suelta y el de las briquetas. El contenido calórico de la broza suelta fue similar al medido para maderas como el ciprés y el eucalipto, provenientes de las leñas que se utilizan regularmente en la empresa como combustibles durante la cosecha y el beneficiado.

Se realizaron pruebas de combustión directa de la broza en briqueta, en hornos de la empresa y en un horno del ITCR. Estas pruebas y sus resultados se detallan en el apéndice, por ser cualitativos. Los resultados se pueden resumir en que la combustión directa de las briquetas de broza, en hornos usados para quemar leña, fue similar a la de la leña, con excelente desempeño en la producción de calor. Se observó una producción significativamente mayor, con respecto a la leña, de aerosol y olor a humo en los gases de combustión. Dado que las emisiones perceptibles son un aspecto crítico para la empresa, se desechó la opción de la combustión directa, sin que se pudiese realizar más experimentación.

Como se explica en la discusión, los ensayos de aplicación del carbón de la broza no se realizaron en ninguna medida. Las estimaciones de impacto en la huella de carbono de la empresa, destinadas a la aplicación del carbón como mejorador de suelos, por lo tanto, tampoco se realizaron.

## **DISCUSIÓN**

La discusión de aspectos operativos de la maquinaria se relega al apéndice.

### Los residuos más relevantes y la relevancia de los residuos.

La identidad de los residuos más relevantes para la empresa está suficientemente explicada y fundamentada en el apartado de resultados. En este proyecto se partió del supuesto de que el secado de los residuos a valorar era un asunto esencialmente resuelto en la empresa. Quedó revelado, sin embargo, que el secado de la broza no está resuelto, y que es un asunto pendiente para poder valorizar la broza por la vía energética.

Para los próximos años se proyecta una producción en la empresa de 230 000 fanegas anuales. El costo de manejo de residuos por fanega es de aproximadamente USD 25-, y puede aumentar debido al aumento de otros costos, como el del transporte y la mano de obra. Es decir, hay un costo de manejo total anual cercano a los USD 6 millones. Por lo tanto, la valorización de los residuos es una vía con gran potencial económico para la empresa, ya que puede sustituir un costo por un valor.

### La carbonización.

Los ensayos en escala intermedia se complementaron con ensayos de laboratorio, a partir de cuyos resultados se pudo tomar decisiones sobre el cumplimiento de los objetivos del proyecto. Fue necesario establecer un método de laboratorio que permitiese evaluar de manera reproducible y representativa el rendimiento esperable de carbón, producto de la carbonización de un material. Se aplicó este método a la broza.

Se halló que los contenidos calóricos de la broza y muestras representativas de las leñas usadas en la empresa eran similares (aproximadamente 17 MJ/kg). También el rendimiento de carbón obtenido de la broza era similar (cerca de 26% m/m). Se halló, sin embargo, una diferencia significativa entre los contenidos calóricos de los carbones, que mientras en las leñas eran de 29,4 MJ/kg para el eucalipto y 43,4 MJ/kg para el ciprés, para la broza era de 8,0 MJ/kg. Al calcular el contenido calórico remanente en el material, después de su carbonización, se obtuvo que en la leña de ciprés fue de 67%, en la leña de eucalipto fue de 45%, y en la broza fue de 13%. Esta cifra llama la atención, y exige confirmación.

En lo que respecta a la carbonización de la broza, a pesar de múltiples búsquedas, se encontró un único trabajo publicado en el que se abordara, por Pallavi y colaboradores (2013). En la comparación de resultados con el caso de Pallavi y colaboradores, se halló alguna similitud en el contenido de ceniza, pues reportan 8,6% de ceniza, algo menos al 11,8% nuestro. Nuestro resultado para ceniza coincide muy cercanamente con el consignado para la broza en la página del ECN de Holanda ([www.ecn.nl/phyllis2/Biomass/View/2307](http://www.ecn.nl/phyllis2/Biomass/View/2307), consultado en marzo 2013), de 11,6%, y es superior a la mayoría de otros reportes de ese dato (por ejemplo Murthy y Naidu, 2012 con 5,4% y 6,2%; Sileshi y colab. 2013 con 7%).

Otros resultados de Pallavi y colaboradores (2013) comparables a los de este trabajo son el rendimiento de carbón de 27% (igual al nuestro), y el contenido calórico reportado para el carbón de la broza, de 9,5 MJ/kg, levemente mayor a los 8,0 MJ/kg nuestros, pero mucho menores que los de carbones de otros materiales biomásicos. Difieren estos investigadores en el contenido calórico de la broza, ya que obtuvieron 11 MJ/kg, en contraste con los 17 MJ/kg hallados en nuestro caso. El ECN de Holanda consigna 19 MJ/kg en su página ([www.ecn.nl/phyllis2/Biomass/View/2307](http://www.ecn.nl/phyllis2/Biomass/View/2307), consultado en marzo 2013), un valor más similar al nuestro, confirmado por Chacón (2007), Montero (2008) y Sileshi y colaboradores (2013). En nuestro caso, se halló que la pudrición parcial de una broza puede llevar a pérdidas significativas en su contenido calórico. Por ejemplo, de dos porciones de una muestra de broza seca, la que fue colonizada levemente por un hongo blanco en las últimas semanas de su almacenaje (por lo que no se tomó en cuenta), tuvo un contenido calórico 13% menor. Los diferentes grados de descomposición podrían ser una razón de las diferencias en el contenido calórico de las brozas. Los autores no indican haber puesto a secar la broza inmediatamente al generarse, como sí se hizo en nuestro caso, y esa podría ser una razón para que su contenido calórico fuese tan bajo.

La utilidad del carbón de broza, con un contenido de ceniza cercano al 30% y un contenido calórico menor a 10 MJ/kg, como fuente de calor en un proceso industrial como el de COOPETARRAZÚ, resulta muy limitada, considerando que la leña es el combustible actual, con contenidos calóricos de aproximadamente el doble, y sus contenidos de ceniza son menores a los de la broza sin carbonizar.

Suponiendo que el poder calórico hallado en el carbón de broza por Pallavi y colaboradores (2013), de 9,5 MJ/kg, se asumiera como el correcto, aún así el remanente energético sería de 15% del contenido del material original, similar al 13% obtenido en este proyecto. Parece confirmarse que más del 85% del contenido calórico de la broza podría perderse en el proceso de carbonización. Es relevante señalar que en las condiciones de laboratorio se controló que la carbonización fuese estrictamente anóxica, pero en un horno de gran tamaño como el que se esperaba usar para carbonizar, las condiciones no son totalmente anóxicas, y por lo tanto el rendimiento de carbón podría ser menor.

La pérdida de al menos 85% del poder calórico de la broza se da en forma de sustancias gaseosas, principalmente hidrocarburos. En el contexto de la implementación industrial de la carbonización de la broza, de no incinerarse los gases que se producen para generar calor, se perdería esa energía, y además se emitirían a la atmósfera. Las sustancias son contaminantes, gases de efecto invernadero, y precursores de la formación de ozono troposférico. En el caso de ser lavados los gases del proceso de carbonización, se mitigarían en alguna medida las emisiones, pero se generaría un problema de manejo de las aguas residuales, que podría ser mayor que el del manejo de las aguamieles, por la toxicidad de algunos de los componentes del humo.

Los grandes inconvenientes de la carbonización de la broza detallados arriba hacen que sea inviable, por sí misma. La gasificación, en cambio, se revela como una opción a explorar, dado que a temperaturas relativamente bajas (500°C) ya se logró gasificar más del 80% del poder calórico de la broza. De quedar un residuo carbonoso de la gasificación de la broza, sería de gran interés probarlo como enmienda de suelo y fertilizante. Sin embargo, evaluar la gasificación de la broza estaba fuera de las posibilidades y de los objetivos del proyecto. La combustión directa de las briquetas de broza debía evaluarse, dado que es la opción que tiene a su alcance actualmente la empresa.

Durante la evaluación de la broza como combustible en los hornos a que se tuvo acceso, si bien la combustión de la broza fue excelente, también fue demasiado alta su producción de humo, y no resultó factible su uso en la empresa por esa razón. El equipo de combustión de que dispone la empresa no incluye ningún paso de tratamiento de los gases de combustión previo a su emisión, de modo que no era factible realizar ajustes en ese sentido. Tampoco era posible hacer ajustes en la temperatura de combustión, solamente en la dosificación del combustible, con lo cual no se logró mejoría suficiente en las emisiones. Para poder aprovechar la broza como combustible, será inevitable una inversión en la adecuación del equipo.

El método desarrollado para evaluar rendimiento de carbonización.

Fue necesario establecer un método de carbonización para aplicarlo a la broza, el cual debía permitir hacer un estimado del rendimiento esperable de la carbonización de un material, en las condiciones previsibles, que eran las del horno adquirido. Las temperaturas y tiempos escogidos se basaron en el funcionamiento del horno, en el tamaño de la muestra, en el tiempo de pirólisis observado en pruebas preliminares, en el análisis termogravimétrico hecho a la broza y en las temperaturas de descomposición de los componentes de materiales biomásicos, reportadas por Slopiecka y colaboradores (2011). En la evaluación del método se observó variabilidad baja, con coeficientes de variación menores a 3% en números mayores a 15 repeticiones. La baja variabilidad se mantuvo en los casos de aplicación del ensayo, lo cual confirmó su repetibilidad y confiabilidad. El método permite hacer comparaciones entre materiales, a la vez que permite caracterizar el carbón que puede dar un material.

#### El potencial de la broza.

A pesar de que la combustión directa de la broza, con el equipo actual que tiene la empresa, no fuese factible, el potencial de la broza para la empresa como combustible es innegable. De acuerdo con los datos de la empresa, el consumo anual de leña ronda los 17000 metros cúbicos. Dada la equivalencia del contenido calórico de la broza y de la madera, la broza que se produjo en la última cosecha equivale aproximadamente a 2500 t de leña. Haciendo un estimado conservador de la densidad másica de la leña usada en COOPETARRAZÚ, de entre 250 kg/m<sup>3</sup> y 500 kg/m<sup>3</sup>, la energía contenida en la broza equivale a entre 30% y 90% de la que se obtiene de la leña que se emplea actualmente.

De los resultados y la discusión se deriva que hay que considerar la gasificación como opción de gran interés para este caso. La gasificación permite un mejor control de la llama y las emisiones, pero requiere de inversiones significativas, en particular para la escala requerida. La gasificación de la broza podría conducir a un residuo carbonoso con alto contenido de ceniza, que podría tener alto valor como enmienda de suelo y fertilizante. Evidentemente, ese residuo será muy diferente del carbón de broza que se podría haber obtenido en este proyecto.

El objetivo 5 está enfocado en la aplicación de los productos, cosa que se hizo con la broza compactada en forma de briquetas, y en su impacto en la huella de carbono.

Dados los resultados de la carbonización de la broza, según los cuales se gasifica un altísimo porcentaje del carbono contenido en ella en forma de hidrocarburos,



manteniéndose solo el 13% del poder calórico original, resulta evidente que no es una vía que pudiese conducir por sí misma a la reducción de la huella de carbono de la actividad. Si los gases producidos durante la carbonización de la broza se incineraran, aprovechando la energía contenida, sí podría reducirse la huella de carbono de la actividad, dado que se sustituiría leña. Esto podría lograrse en un proceso de gasificación, por ejemplo.

El impacto sobre la huella de carbono para al sustituir leña podría verse en aspectos relacionados con el transporte y pasos de secado y procesamiento de la broza, que representan diferencias marginales. El uso con mayor potencial de impacto en la huella de carbono, es el del carbón en el suelo, por las esperadas reducciones en requerimientos de insumos agrícolas, pero el requisito sería la incineración de los gases pirolíticos, como ya se explicó.

#### El secado de la broza: un problema por resolver

Previo a la compactación o concentración de la energía de la broza, por cualquiera de los métodos disponibles, está el secado. El secado de la broza es un asunto irresuelto en la industria del café de Costa Rica. Las vías de valorización que requieren el material seco, como la gasificación, la combustión directa, e incluso el uso en forrajes u otros materiales, estarán cerradas mientras el secado siga irresuelto. Una de las dificultades es que la cosecha del café coincide con la época lluviosa y la transición hacia la época seca, de modo que el secado en espacios abiertos es laborioso, y se reserva para el grano de café, que tiene un valor mucho mayor. Esta investigación deja en evidencia el tema del secado como un tema prioritario por resolver, para acceder a vías de valorización de la broza que la requieran seca. El uso de calores residuales de la industria del beneficiado para lograr ese secado de la broza, sería un modo de hacerla económica y ambientalmente más factible.

## **CONCLUSIONES**

Se logró establecer y dominar un conjunto tecnológico y de conocimiento, que permite la evaluación de la carbonización, en vistas al aprovechamiento energético de residuos biomásicos. Este conjunto queda disponible dentro del ITCR.

Se generó un método de laboratorio para la estimación del rendimiento de carbón esperable de un material biomásico. Este método es confiable y reproducible.

Los residuos más relevantes de la empresa COOPETARRAZÚ, de momento, son la broza y las aguamieles. Es en estos dos residuos que se deben enfocar los esfuerzos de valorización, con el objeto de que se asegure un manejo óptimo.

Los resultados de este proyecto indican claramente que para la broza, la carbonización por sí misma no es una opción ambiental ni económicamente viable.

Concomitantemente y por las mismas razones, la gasificación de la broza se reveló como una interesante opción de valorización energética de la broza, la cual se debe explorar.

El secado de la broza se reveló como un tema no resuelto para la industria del café, señalando una línea de acción necesaria para poder acceder a la valorización energética de la broza.

La broza que se genera en la empresa podría desplazar una gran parte o la totalidad de la leña que actualmente se consume, mitigando los costos de manejo, la huella de carbono asociada al uso de la leña y otros problemas.

Aunque la combustión directa es la vía de aprovechamiento energético de la broza que se encuentra más a la mano actualmente para la empresa, requiere de la implementación de sistemas de limpieza de los gases de combustión.

## **RECOMENDACIONES**

Se debe terminar de establecer las vías de aprovechamiento energético de la broza dentro de los beneficios, sustituyendo gran parte o todo el combustible que actualmente consumen en el proceso de secado del café. El TEC debe acompañar este proceso hasta el final.

La empresa debe considerar cuidadosamente la opción de implementar tratamientos a sus emisiones, con el fin de poder usar la broza en combustión directa. Este hecho no debe ser considerado como negativo, sino como una razón más para implementar los tratamientos de las emisiones que hasta el momento han quedado pendientes, debido a que la normativa actual no obliga a implementarlas, pero que son una deuda con el ambiente y con la sociedad.

La gasificación de la broza se debe abordar como opción óptima para su aprovechamiento energético. Tanto el TEC como la empresa deben ser actores en este emprendimiento.

El TEC debe comprometerse en la resolución del tema específico del secado de la broza, sea mediante el desarrollo de una tecnología única y óptima, sea mediante el desarrollo de varias tecnologías.

## **Agradecimientos:**

A la Vicerrectoría de Investigación y Extensión se le agradece por el financiamiento y el apoyo. A COOPETARRAZÚ se le agradece su hospitalidad y su apoyo decidido y generoso a este proyecto. A los asistentes Jeremy Mata, Esteban Monge y Álvaro Hernández, se les agradece su entusiasta colaboración y aporte. A la compañera Lic. Laura Hernández se le agradece su decidida participación durante el primer semestre del 2012. Se agradece a l@s revisor@s de estos informes por su contribución a que fuese mejor.

## **Fuentes bibliográficas.**

Antal MJ, Grønli M, The Art, Science, and Technology of Charcoal Production, Ind. Eng. Chem. Res. 2003, 42, 1619-1640.

ASTM D1102 - 84(2007) Standard Test Method for Ash in Wood

ASTM E711-87(2004) Standard Test Method for Gross Calorific Value of Refuse-Derived Fuel by the Bomb Calorimeter (Withdrawn 2004)

ASTM E870 - 82(2013) Standard Test Methods for Analysis of Wood Fuels

ASTM E871 - 82(2006) Standard Test Method for Moisture Analysis of Particulate Wood Fuels

Castro A., Costa F.S., Drying and burning characteristics of ripe branco wood cylinders, Thermal Eng. 6 (2007) 35–40.

Chacón-Araya R, Diseño y construcción de un sistema de gasificación para la generación de calor de proceso y energía eléctrica, utilizando los subproductos (pulpa y cascarilla) del beneficiado como fuentes de energía, Revista Informativa ICAFE II-2007, p 11.

Chan, K. Y. A E, L. Van Zwieten B, I. Meszaros A, A. Downie C D, S. Joseph D. Agronomic values of greenwaste biochar as a soil amendment; Soil Research 45(8) 629–634; <http://dx.doi.org/10.1071/SR07109>. Published online: 7 December 2007.

Xiangfeng D, Norberg N and Antal MJ, PRODUCTION OF CHARCOAL AND ACTIVATED CARBON AT ELEVATED PRESSURE, American Chemical Society, Division of Fuel Chemistry; Journal Volume: 40; Journal Issue: 2; Conference: 209. American Chemical Society (ACS) national meeting, Anaheim, CA (United States), 2-6 Apr 1995.

ECN , Holanda ([www.ecn.nl/phyllis2/Biomass/View/2307](http://www.ecn.nl/phyllis2/Biomass/View/2307), consultado en marzo 2013).

Gangaputra, R. Production of Electricity Using Coffee Husk. International Conference on Technology and Business Management March 18-20, 2013. P 912

Horwitz, W. Latimer, GW. Official methods of analysis of the AOAC, 18th edition, Gaithersburg, 2005.

Kammen D, Lew D J, Renewable and Appropriate Energy Laboratory Report: Review of Technologies for the Production and Use of Charcoal; Energy and Resources Group & Goldman School of Public Policy, University of California, Berkeley, CA 94720-3050. National Renewable Energy Laboratory. March 1, 2005

Laird, D. (2008) The charcoal vision: A win–win–win scenario for simultaneously producing bioenergy, permanently sequestering carbon, while improving soil and water quality. *Agronomy Journal* 100: 178-181.

Lehmann J. Bio-energy in the black, en Frontiers in Ecology and the Environment; 2007, 5, 381-387.

Lehmann, J. (2006). Black is the new green, *Nature* 442: 624-626.

Lehmann, J., da Silva Jr., J.P., Steiner, C., Nehls, T., Zech, W. and Glaser, B.: (2003), Nutrient availability and leaching in an archaeological Anthrosol and a Ferralsol of the Central Amazon basin: fertilizer, manure and charcoal amendments, *Plant and Soil* 249: 343-357.

Lugano W, Geoffrey RJ, Cuthbert FM, Weihong Y, Wlodzimierz B, Coffee husks gasification using high temperature air/steam agent, *Fuel Processing Technology*, Volume 91, Issue 10, October 2010, Pages 1330-1337.

Major J; Rondon M, Molina D, Riha SJ, Lehmann J. Maize yield and nutrition during 4 years after biochar application to a Colombian savanna oxisol. *Plant and Soil*; August 2010, Volume 333, Issue 1-2, pp 117-128.

McHenry, M.P. (2009) Agricultural bio-char production, renewable energy generation and farm carbon sequestration in Western Australia: Certainty, uncertainty and risk. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 129 (1-3). pp. 1-7.

Montero-Gómez E, Propuesta de aprovechamiento energético de los subproductos del café : gasificación de la broza + bioetanol = energía, *Revista Informativa ICAFE I-2008*, p 4.

Murthy PS., Naidu MM, Sustainable management of coffee industry by-products and value addition—A review, *Resources, Conservation and Recycling* 66 (2012) 45– 58.

Oguntunde PG, Fosu M, Ayodele E. Aj, van de Giesen N. Effects of charcoal production on maize yield, chemical properties and texture of soil, *Biology and Fertility of Soils*; March 2004, Volume 39, Issue 4, pp 295-299.

Pallavi.H.V, Srikantaswamy.S, Kiran B.M, Vyshnavi.D.R and Ashwin.C.A. Briquetting Agricultural Waste as an Energy Source. *JECET*; December 12- February 2013; Vol.2.No.1, 160-172.

Ramírez. F., Roldán, C. (2007) ENCUESTA DE OFERTA Y CONSUMO ENERGÉTICO NACIONAL A PARTIR DE LA BIOMASA EN COSTA RICA AÑO 2006.

San José: MINAE.

RECOPE (2008), Boletín (Boletín 27 del 18 de abril del 2008) San José: RECOPE.

Rodriguez C, Gordillo G. Adiabatic Gasification and Pyrolysis of Coffee Husk Using Air-Steam for Partial Oxidation. Journal of Combustion, Volume 2011, Article ID 303168, 9

Sileshi K, Ababayehu A, Mayerhofer M, Spliethoff H. Steam Gasification of Coffee Husk in Bubbling Fluidized Bed Gasifier. BIONATURE 2013: The Fourth International Conference on Bioenvironment, Biodiversity and Renewable Energies, pp 17-20.

Slopiecka K., Bartocci P., Fantozzi F., Thermogravimetric analysis and Kinetic study of poplar wood pyrolysis. Third International Conference on Applied Energy - 16-18 May 2011 - Perugia, Italy. pages 1687-1698

Suárez JA, Luengo CA. Coffee Husk Briquettes: A New Renewable Energy Source. Energy Sources Volume 25, Issue 10, 2003a; pp. 961-967.

Suárez JA, Luengo CA, Fonseca FF, Bezzon G, Beaton PA; Thermochemical Properties of Cuban Biomass, EnergySources, Volume 22, Issue 10, 2000, pages 851-857

Suárez JA, Physical Properties of Cuban Coffee Husk for Use as an Energy Source. Energy Sources, Volume 25, Issue 10, 2003; pp 953-959.

Tenorio C, Moya R, Thermogravimetric characteristics, its relation with extractives and chemical properties and combustion characteristics of ten fast-growth species in Costa Rica, Thermochemica Acta 563 (2013) 12– 21

Woolf, D.; Amonette, J., Street-Perrott F.; Lehmann, J.; Joseph, S. Sustainable biochar to mitigate global climate change. Nature Communications 2010

(<http://www.nature.com/ncomms/journal/v1/n5/full/ncomms1053.html>)

# APÉNDICE

# 1.- Objetivos y otros detalles de la formulación de la propuesta.

## Objetivo General del Proyecto

Elaborar un paquete (conjunto) tecnológico funcional para la valorización de residuos biomásicos de la agroindustria cafetalera mediante la carbonización en escala intermedia, para la utilización del producto como fuente de energía renovable y como mejorador de suelos, posibilitando eliminar la contaminación que producen esos residuos como desechos y reducir la huella de carbono de la actividad.

## Objetivos específicos del Proyecto

- 1.- Adquirir e instalar los equipos de secado, molienda y de carbonización.
- 2.- Definir los 3 residuos de mayor interés (entre los del beneficiado y los del cultivo) y el modo de hacerlos disponibles en el momento adecuado para su procesamiento
- 3.- Establecer los sitios, aplicaciones, y condiciones experimentales para probar los productos.
- 4.- Procesar los materiales escogidos y optimizar el procedimiento.
- 5.- Evaluar (probar) los productos en su obtención, en su aplicación y en su impacto en la huella de carbono.

## Principales Resultados Esperados

- 1.- Que el TEC tenga capacidad instalada y técnica para la evaluación de la carbonización como vía de valorización de materiales biomásicos residuales, de modo que pueda brindar o incluso vender esta asesoría a empresas interesadas.
- 2.- Que el TEC tenga el equipo que permita la instalación de una planta piloto para la producción de biocarbón a partir de residuos biomásicos, con capacidad de 3000 kg/día.
- 3.- Evaluación de los 3 principales residuos biomásicos de COOCAFÉ, y con ello de la actividad cafetalera en general, lo cual abrirá posibilidades de asesoría y colaboración con la industria cafetalera nacional.
- 4.- Evaluación de 3 productos de valor comercial (biocarbón: a) para energía en el ámbito doméstico, b) para energía en el ámbito industrial, y c) como mejorador de suelos).
- 5.- Establecimiento de al menos una nueva línea de colaboración con COOCAFÉ en el campo de las energías renovables, en seguimiento de este proyecto.

## 7. Actividades Principales

### PLAN DE ACCIÓN

Objetivos específicos	Resultados	Actividades	Meses
1.- Adquirir e instalar los equipos de secado, molienda y de	1 y 2	-Tramitar compra y transporte de equipos.	1
		-Instalar equipos. -Asegurar funcionamiento adecuado de	4



carbonización		equipos.	4 y 5
2.- Definir los residuos de mayor interés y el modo de hacerlos disponibles en el momento adecuado para su procesamiento.	3 y 4	-Definir con COOCAFÉ residuos a priorizar -Definir con COOCAFÉ los espacios para tratamiento y almacenamiento de materia prima -Secar y almacenar el material para su eventual procesamiento	1 1 1 a 7
3.- Establecer los sitios, aplicaciones, y condiciones experimentales para probar los productos.	4 y 5	-En coordinación con COOCAFÉ establecer dónde aplicar el producto como fuente de energía -En coordinación con COOCAFÉ establecer dónde aplicar el producto como mejorador de suelos. -En coordinación con COOCAFÉ establecer el diseño experimental para evaluar el producto como mejorador de suelos.	1 a 3 1 a 3 1 a 5
4.- Procesar los materiales escogidos y optimizar en lo posible el procedimiento.	4	-Procesar la materia prima evaluando rendimiento y calidad en función de condiciones variables. -Obtener la cantidad necesaria de biocarbón para las evaluaciones	6 a 8 6 a 8
5.- Evaluar (probar) los productos en su calidad, en su aplicación y en su impacto en la huella de carbono	4 y 5	-Evaluar contenido calórico y otros parámetros de interés en los productos obtenidos. -Evaluar la aplicación del producto como fuente de energía en al menos 2 aplicaciones en sitios definidos con COOCAFÉ -Evaluar el producto como mejorador de suelo bajo el diseño experimental acordado previamente con COOCAFÉ -Elaborar una síntesis de los resultados con una interpretación -Evaluar en colaboración con COOCAFÉ el impacto en la huella de carbono bajo escenarios previsibles de su producción y uso del biocarbón	6 a 10 6 a 10 8 a 12 10 a 12 9 a 12

**Indicadores para la evaluación y monitoreo del proyecto.**

<b>Mes del proyecto</b>	<b>Indicador de logro</b>	<b>Resultado de referencia</b>
2	Compra de equipos en marcha, trámites iniciales hechos.	1 y 2
2	Definición de residuos a priorizar y de los espacios para tratamiento y almacenamiento de materia prima	3 y 4
4	Definición de dónde se aplicará el producto como fuente de energía de dónde se aplicará el producto como mejorador de suelos.	4 y 5

5	Equipos instalados y funcionando	1 y 2
5	Definición del diseño experimental para las pruebas con el mejorador de suelos	4
7	Resultados preliminares de la evaluación de materias primas y sus productos carbonáceos.	4
8	Producto suficiente (5 toneladas) para hacer las pruebas	4
9	Resultados completos de la evaluación de parámetros de los productos	4
12	Evaluación proyectada del impacto en la huella de carbono de la actividad.	4 y 5
12	Resultados de las pruebas con su interpretación.	4 y 5

## 2.- Resultados de las etapas preparatorias y de implementación, por objetivo.

### Objetivo 1.- Adquirir e instalar los equipos.

Se debía adquirir un equipo de una escala tal, que permitiese implementar pruebas en la planta beneficiadora y en el suelo con las cantidades de materiales producidos. En enero del 2011 se iniciaron las gestiones de búsqueda y adquisición de un equipo óptimo, resultando que los equipos chinos y del sur y sureste de Asia tenían precios mucho menores, y las empresas eran más accesibles por internet. Se buscó la empresa que tuviese comunicación más clara y coherente, entre las que ofrecían la maquinaria de interés. Se buscó una empresa que ofreciera el servicio de fiscalización en China, a fin de que la inversión de tiempo y dinero fuese segura.

#### Logros y resultados

Se adquirieron equipos de escala intermedia detallados en el cuadro A1. Estos equipos fueron construidos por la empresa Leemay (Zhengzhou, Henan, China), y estuvieron disponibles en noviembre del 2011 en la planta “El Marqués” de Coopetarrazú.

Cuadro A1. Equipo de escala intermedia adquirido para este proyecto.

<b>EQUIPO</b>	<b>TIPO</b>	<b>MODELO</b>	<b>CAPACIDAD</b>	<b>CONSUMO/kW</b>
Molino	De martillos	CPFS-30	>150 kg / hora	4
Secador	Arrastre con aire caliente	HGJ-1	>200 kg / hora	4
Briqueteador	Extrusión en caliente	ZT-50	>150 kg / hora	21
Horno	Para carbonizar, 3 m <sup>3</sup>	THL-3	>500 kg / carga*	4 (máx.)*

\*Cada carga requiere entre 30 y 48 horas; el motor opera durante menos de 5 de esas horas.

La instalación y puesta en marcha de los equipos se completó en mayo 2012 en un espacio construido por COOPETARRAZÚ, y con la ayuda de sus técnicos. Dominar su funcionamiento requirió mucho aprendizaje a partir de experiencia, aparte de algunas modificaciones menores en las que COOPETARRAZÚ prestó gran ayuda, y se logró completamente en septiembre del 2012. En la figura X se esquematizan los procesos que permite la maquinaria adquirida e instalada. Dependiendo de las características del residuo biomásico seco, este debe ser molido como primer paso, o puede pasar a otra de las etapas del proceso. El proceso usualmente terminaría con la carbonización del material briqueteado o termoformado. Sin embargo, como se muestra en el esquema, podría ocurrir que un residuo carbonizado en su estado original fuese molido y sometido al termoformado con un aglutinante, para obtener briquetas de carbón. También podría ocurrir que un residuo suficientemente seco solo requiera de molienda para pasar al termoformado, o que un residuo esté en un tamaño de partícula que permita pasarlo por el secador sin molienda previa, como sería el caso de un aserrín.

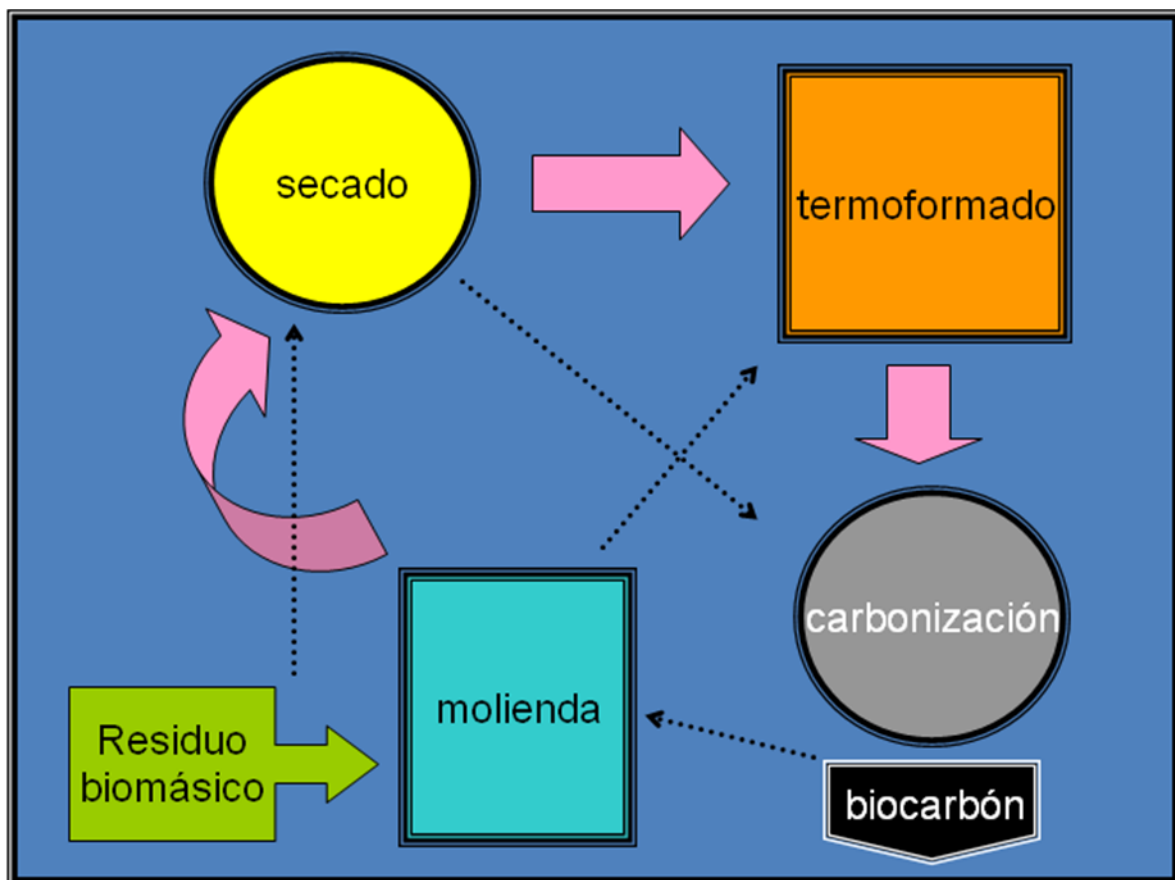


Figura A1. Esquema de los procesos que se posibilitaron con la maquinaria adquirida e instalada.

## Objetivo 2.- Determinar los residuos más relevantes.

Los resultados se consignan en el apartado de resultados de este informe.

## Objetivo 3.- Establecer los sitios, aplicaciones, y condiciones experimentales para probar los productos.

En entrevistas con personas claves de la empresa y otros expertos se determinó cómo se probarían los productos. Los usos contemplados fueron el energético y el de mejoramiento de suelos. A continuación se resumen los planes:

Uso energético: se evaluaría el carbón en los hornos de la planta, bajo condiciones de trabajo normales.

Uso como mejorador de suelos: se evaluaría el carbón en terrenos de la cooperativa, con cultivos como plántulas de café y cultivos forestales.

## Objetivo 4.- Procesar los materiales escogidos y optimizar el procedimiento.

### Molienda y secado de la broza.

La broza secada en patio, provista por COOPETARRAZÚ, se sometió a molienda y secado final en una sola operación. Ambos equipos utilizan una corriente de aire para el transporte del material, de modo que se conectaron mediante un conducto ambos equipos para que el material que se molía, pasara enseguida al secador. Se utilizó solamente el ciclón del secador para recolectar el material. El calor del secador se obtuvo por medio de la combustión de materiales biomásicos en la hornilla que tiene para este propósito. Aunque el secador está recomendado por el fabricante para materiales con humedades menores a 20% y en partículas de 5 mm, se probó con materiales más húmedos y con partículas más grandes.

Esta modalidad de secado permitió reducir la humedad de la broza desde entre 15% y 25% hasta entre 5% y 10%. En el cuadro A2 se sintetizan las observaciones de pruebas hechas con varios residuos biomásicos y con la broza en varios estados.

Cuadro A2: Desempeño del secador con varios sustratos biomásicos.

<b>Material probado</b>	<b>Desempeño</b>	<b>Observaciones</b>
Astillas de madera	Regular	Partículas grandes o largas ocasionaron acumulaciones que condujeron a bloqueos.
Aserrín húmedo (>40% humedad)	Regular	Hubo algunas acumulaciones de material. Fue necesario realizar más de un paso para lograr un secado suficiente.
Cascarilla (<15% humedad)	Bueno	No hubo acumulaciones. La pérdida de humedad fue marginal, dado que el material estaba ya muy seco.
Broza entera semiseca (<30% humedad)	Regular	Hubo acumulaciones en el conducto. El material se secó muy bien (<10% humedad).
Broza entera húmeda	Malo	Por la adherencia entre partículas y la densidad del material, se dieron bloqueos que más tarde condujeron a corrosión del conducto. Pasó solo una fracción de la broza introducida.
Broza molida seca (<25% humedad)	Bueno	No hubo acumulaciones y el resultado fue excelente (<10% humedad).

#### Extrusión de las briquetas de broza.

En el briqueteador se logra la plastificación del material mediante calentamiento, haciendo posible la adherencia de las partículas entre sí por estar sometidas a altísimas presiones, provistas por un motor de 15 kW que impulsa el tornillo alimentador. El calor

requerido en esta operación es provisto mediante resistencias que calientan el cañón del aparato. Es posible variar la temperatura del cañón del briqueteador, por el que pasa el material durante su extrusión. La velocidad de giro del tornillo impulsor es constante; sin embargo, fue posible variar el flujo de alimentación mediante la variación de la densidad aparente del sustrato. Se hicieron múltiples pruebas para determinar las temperaturas nominales del cañón, adecuadas para briquetear la broza en los diversos estados en que fue provista por la empresa. El método que funcionó mejor fue el de aproximarse desde temperaturas menores, evitando activamente la formación de bloqueos en el cañón por medio de revertir el giro del tornillo alimentador cuando se redujera el flujo de material.

### Observaciones

En la determinación de la temperatura del cañón óptima para briquetear la broza, se determinó que eran temperaturas nominales (indicadas en la carátula del aparato) de entre 210°C y 230°C. Se logró obtener briquetas de broza a partir de material molido y secado, y a partir de broza secada en el patio y sin moler. La broza recién molida y secada debió briquetearse inmediatamente, antes de que se enfriara, pues de otro modo no se lograba suficiente adherencia entre las partículas. Con la broza molida pero fría se probó aumentar la temperatura del cañón; esto resultó inefectivo, debido a que las resistencias no tenían la potencia necesaria para mantener la temperatura seleccionada. En cambio, la broza fría sin moler resultó fácil de briquetear, debido a que su menor densidad aparente hacía que su flujo por el cañón fuese menor que el de la broza molida, dando como resultado un calentamiento suficiente para su plastificación y la adherencia entre las partículas. En el cuadro A3 se resumen los datos numéricos correspondientes; es evidente una cercana relación entre el ritmo o velocidad de producción logrado y la densidad del sustrato.

Cuadro A3. Velocidad de producción de briquetas de broza a partir de broza molida y sin moler.

<b>Estado de la broza</b>	<b>Densidad broza suelta (g/cm<sup>3</sup>)</b>	<b>Densidad briquetas (g/cm<sup>3</sup>)</b>	<b>Producción (kg/h)</b>
Sin moler	0,18	0,91	130 - 160
Molida y caliente	0,53	1,06	> 400

De acuerdo con los datos del cuadro, si se briquetea la broza molida recién secada en el secador, el ritmo de producción se triplica con respecto al de la broza entera secada en patio solamente. El consumo de electricidad podría también ser menor, dado que los motores del secador y el molino son de 4kW cada uno.

Se determinó claramente que la presencia de cascarilla en la broza favorecía las expulsiones explosivas y un flujo discontinuo del material. Durante pruebas de briquetado de la cascarilla, se había observado la formación de humo y gases a temperaturas menores a los 200°C en el cañón, y una adherencia pobre o nula entre las partículas.

### Carbonización

Una vez hechas pruebas de funcionamiento del horno, se realizaron pruebas de carbonización con diferentes materiales. En 2 pruebas, se cargaron diversos materiales, principalmente broza, dentro de cilindros de malla de acero de 40 cm de diámetro y 120 cm de altura, los cuales se colocaron dentro de la cámara del horno. Las cargas de broza fueron del orden de los 40 kg por cilindro, aproximadamente. El horno utiliza un abanico con motor de 4kW para hacer pasar gases de combustión calientes que entran a la cámara del horno a través de una hornilla para materiales biomásicos como leña. Los gases de combustión de la hornilla calientan el horno, luego de ser distribuidos por su cámara por medio de una parrilla de tubo con orificios de 8 mm, que se halla en el piso de la cámara. El abanico genera un vacío en el sistema y expulsa los gases a través de la chimenea hacia la atmósfera. Antes de llegar al abanico, los gases pasan por una fase de lavado con agua. La puerta del horno requiere de ser sellada cada vez que se usa el horno. Se logró muy buen sello usando arcilla mezclada con material biomásico fibroso, como aserrín. Para el control de temperatura se usó el termómetro de carátula, ubicado sobre la puerta del horno. La recomendación de la empresa fabricante fue mantener el abanico y el fuego encendidos para lograr temperaturas entre 200°C y 300°C, y apagar y sellar la entrada de aire una vez que no se pudiera evitar alcanzar los 500°C. Se realizó una prueba bajo estas condiciones y otra posterior manteniendo por sobre los 300°C durante 3,5 horas. En ambos casos, luego de apagar el abanico por última vez, se selló el horno contra entradas de aire.



En la figura A2 se muestra la temperatura para la primera prueba con carga de materiales. Se muestran las primeras horas de la prueba. La temperatura era de 100°C al cabo de 22 horas. El horno se abrió una semana después. En la figura se marcan las temperaturas a las que se encendió o se apagó el abanico del horno. Al apagar por última vez, se cerraron las entradas de aire.

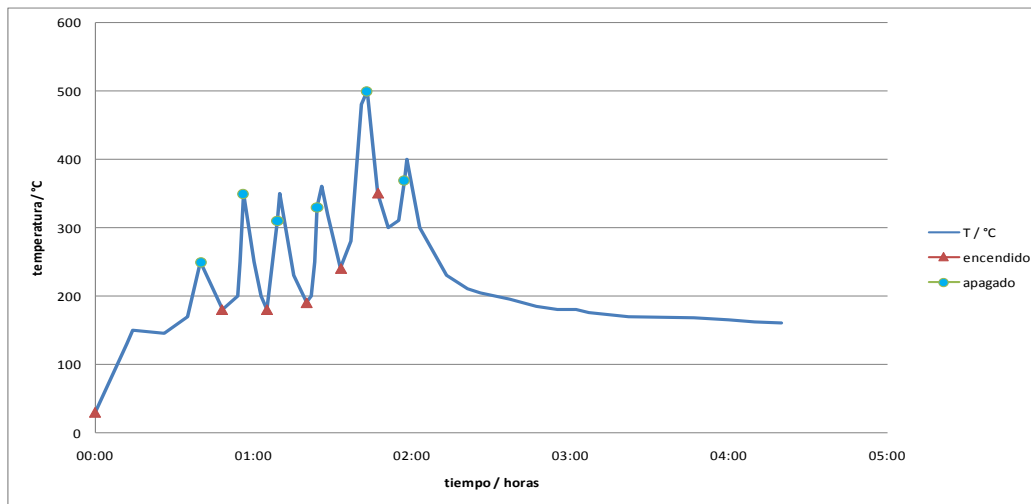


Figura A2. Temperatura del horno medida en el termómetro de carátula durante la primera prueba de carbonización.

En esta primera prueba, se obtuvieron diversos grados de carbonización en los materiales probados. En el cuadro A4 se muestra un resumen de observaciones cualitativas. Se observó para la broza suelta que, en un cilindro, una parte significativa de la broza se había quemado, quedando ceniza, mientras en otro el cambio había sido leve, con un grado de carbonización escaso. En todos los casos, la capa de material carbonizado no superó los 20 cm de espesor por encima, y los 10 cm de espesor a los lados. En el caso de la broza en briqueta, que fue colocada en un cilindro, se observaron desde briquetas totalmente reducidas a ceniza en la parte superior, hasta briquetas con muy poco cambio en la parte inferior. En el caso de la cascarilla, uno de los cilindros mostró capas externas carbonizadas menores a 5 cm, y en el otro hubo una alta proporción de combustión completa en la parte superior. Hubo mayor incidencia de reducción a ceniza en los materiales que quedaron cerca de la puerta del horno, que en los que estuvieron en el centro o en la parte de atrás.

Cuadro A4. Masa remanente del material sometido a la primera prueba de carbonización.

	Promedio	N	Máximo	Mínimo
<b>Broza suelta</b>	75%	6	91%	48%
<b>Broza briqueta</b>	71%	1	-	-
<b>Cascarilla</b>	40%	2	71%	10%

La figura A3 corresponde a la segunda prueba de carbonización. Se instalaron sensores de temperatura (TP = termopar) en varias partes del horno, a fin de evaluar la uniformidad de la temperatura. El termómetro del horno es de carátula, y está ubicado por encima de la puerta. La línea correspondiente al desvío promedio (parte baja del gráfico) muestra que a partir del momento en que el horno pasó de 300°C hubo diferencias de temperatura mayores entre diferentes regiones del horno, con desviaciones promedio que sobrepasaron los 100°C. La dispersión de las temperaturas se redujo a partir de los 210 minutos, aproximadamente.

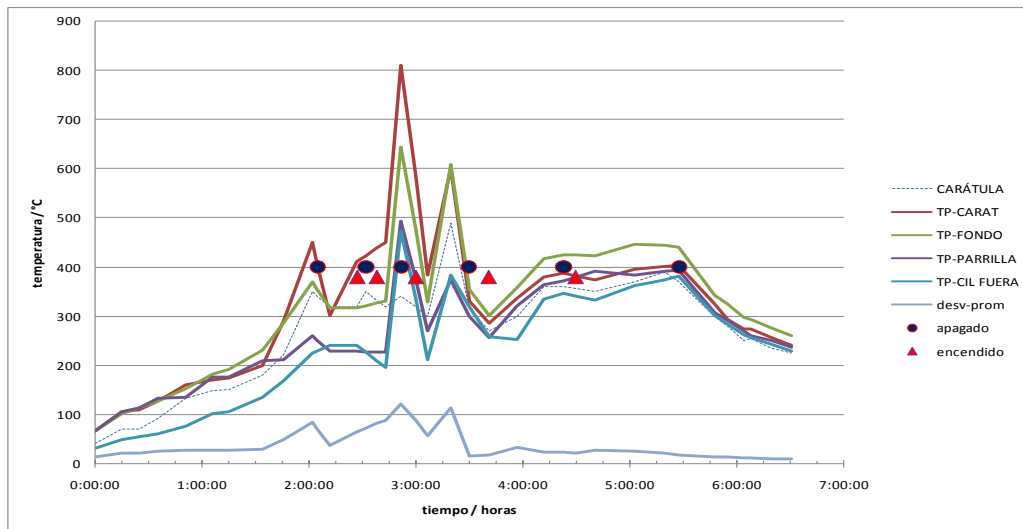


Figura A3. Temperatura del horno durante la segunda prueba de carbonización, medida con varios termómetros ubicados en diferentes partes del horno.

En este caso, la broza en briquetas resultó completamente convertida a ceniza. La broza suelta tuvo una mejor carbonización, quedando 22%, 25% y 35% de la masa remanente, pero con gran proporción de ceniza. La leña de diámetros menores a 5 cm puesta en una de las canastas se quemó completamente, quedando solo ceniza. Las

piezas de madera (ciprés y eucalipto) de diámetros mayores a 10 cm se carbonizaron hasta profundidades de entre 16 mm y 25 mm. El aserrín húmedo puesto en una de las canastas se carbonizó solamente en los primeros 15 mm en los lados, y en los primeros 50 mm en la parte superior.

Es relevante mencionar que el proceso de carbonización involucró esfuerzo, materiales y tiempo en cantidades considerables, principalmente durante la carga y descarga del horno. Una operación de estas implicaba el transportar hasta el sitio por lo menos 2 personas temprano por la mañana, encender el horno por la tarde, dejar el horno apagado ya por la noche, regresar al día siguiente para verificar las temperaturas, y volver a la planta después de que se hubiera enfriado el horno para descargarlo y revisar los resultados, proceso en el que se consumía otro día. Para efectos de investigación, se justificaba por la necesidad de disponer de cantidades de material suficientes para hacer pruebas en la planta y en el suelo.

Posiblemente hoy resultaría más práctico utilizar la maquinaria dentro de las instalaciones del TEC, y llevar allí el material para los ensayos. Sin embargo, para este proyecto el apoyo de la empresa para la instalación y puesta en funcionamiento de la maquinaria, fue crucial y muy efectivo, dando resultados que no se habrían logrado en el TEC en ese momento, donde no existía siquiera un lugar para instalarse.

#### Pruebas de laboratorio

Los resultados de estas pruebas se dan en el apartado de resultados de este informe.

#### Objetivo 5.- Evaluar (probar) los productos en su obtención, en su aplicación y en su impacto en la huella de carbono.

Los ensayos de carbonización de la broza en el horno revelaron dificultades significativas para la obtención de carbón de broza en las cantidades requeridas para las pruebas subsecuentes. Las pruebas en el laboratorio revelaron que la energía remanente tras la carbonización de la broza era cercana al 15% de la original (ver discusión). Las implicaciones (ver discusión) llevaron a la decisión de no producir el carbón necesario para las pruebas en la planta ni en el suelo, y más bien probar las briquetas de la broza sin carbonizar, como combustible en los hornos de la empresa y en un horno de secado de madera del ITCR.

#### **Pruebas de combustión directa en horno de secado de madera**

Se introdujeron cantidades de entre 1 kg y 3 kg de broza en briqueta en la hornilla encendida de un secador de madera (marca Nardi, Italia) del ITCR. Esta hornilla por lo regular requiere de cargas parciales de unos 10 kg de leña para mantenerse funcionando. Se observó el efecto en la salida de los gases de combustión, es decir, de la chimenea, durante los siguientes 10 minutos.

### **Observaciones**

La combustión de la broza fue similar a la de la leña, una vez estuvo caliente la hornilla. Se observó un aumento muy notorio en la carga de aerosol de los gases emitidos por la chimenea dentro de los siguientes 3 minutos de haber introducido las briquetas de broza a la hornilla. Se observó también un aumento notorio del olor a humo de los gases a una distancia de más de 30 metros.

### **Pruebas de combustión directa en hornos de la empresa**

Se realizaron pruebas en dos hornos de la empresa, uno usado para mantener funcionando una caldera, otro usado para calentar una corriente de aire para secado. Se introdujeron cantidades de entre 5 kg y 15 kg de broza en los hornos en plena operación, los cuales requieren de cargas parciales de unos 20 a 40 kg de leña para mantenerse funcionando. Se observó el efecto en la salida de los gases de combustión, es decir, de la chimenea, durante los siguientes 10 minutos.

### **Resultados**

La combustión de las briquetas de broza fue excelente, con muy buena persistencia en el tiempo sin perder la forma, y excelente mantenimiento de la temperatura del horno. Se observaron aumentos muy notorios en la carga de aerosol de los gases emitidos por las chimeneas dentro de los siguientes 3 minutos de haber introducido las briquetas de broza a las hornillas. Se observó un aumento notorio del olor a humo de los gases. La gerencia de la empresa giró órdenes de interrumpir el experimento a la brevedad posible, dados los problemas que las emisiones podrían representar a la empresa con la población circundante.