

ARTÍCULO DE INVESTIGACIÓN

Factibilidad de generación de electricidad mediante gasificación de residuos de aserradero en el norte de México

Feasibility of generating electricity through gasification of sawmill residues in the North of Mexico

Salvador Balderrama-Castañeda¹, Concepción Luján-Álvarez²,
David K. Lewis³, Juan A. Ortega-Gutiérrez¹,
Bernardus H.J. de Jong⁴ y Tonatiuh Nájera-Ruiz⁵

RESUMEN

Se evaluó la factibilidad de generar energía eléctrica a partir del uso de residuos del aserrío mediante la tecnología de gasificación en dos aserraderos ejidales, Rocheachi (RO) y Tatahuichi (TA), en el municipio de Guachochi, Chihuahua. El área se ubica en un clima semifrío, con medias anuales de temperatura y precipitación de 10,6 °C y 800 mm, respectivamente; la vegetación está constituida por bosque de pino y pino-encino; las especies maderables son principalmente *Pinus arizonica* y *P. durangensis*. Se caracterizó el flujo de residuos, su composición química y su valor energético. Se seleccionó la tecnología de gasificación de cama fija con flujo hacia abajo con costos y especificaciones de un proveedor chino. Se asumió una conversión bioenergética de 1,3 kgMS/kWh y un factor de planta de 80%; el uso total de la electricidad sería alumbrado público municipal al 80% del costo de la tarifa normal. Se evaluó la viabilidad financiera de sistemas con capacidades a (100, 200, 400 y 800) kW bajo tres escenarios: base, optimista y pesimista. Se valoró el efecto de ingresos adicionales por venta de bonos de carbono en el mercado voluntario a (4, 5 y 6) US\$/tCO₂. La tasa interna de retorno (TIR) se incrementó consistentemente con la capacidad del sistema; el sistema a 800kW tuvo la mejor perspectiva económica. Los resultados fueron negativos y positivos en todos los escenarios para las capacidades de 100 kW y 800 kW, respectivamente. Sin bonos de carbono, la rentabilidad privada solo resulta aceptable (13%) en el sistema a 800kW en un escenario optimista. El impacto de los bonos se reflejó en incrementos en la TIR de 1,1 a 1,6% en el sistema de 400 kW y de 2,3 a 2,9% en el de 800 kW. Bajo estas condiciones, los sistemas evaluados reunirían los requisitos de adicionalidad que demanda el mercado del carbono.

PALABRAS CLAVE:

Energía eléctrica, residuos de aserrío, gasificación, factibilidad.

- 1 UACH, Facultad de Zootecnia y Ecología, Km. 1 Perif. F.R. Almada s/n, Chihuahua. CP 31453. c.e.: sbalderr@uach.mx,
- 2 UACH. Facultad de Ciencias Agrícolas y Forestales. Km. 2.5 Carretera Delicias-Rosales, Delicias, Chihuahua, Mex. CP 33000. c.e.: clujan@uach.mx
- 3 Oklahoma State University, Stillwater, Oklahoma.
- 4 El Colegio de la Frontera Sur, Villahermosa, Tabasco, México.
- 5 SolBridge International School of Business. Daejeon, Corea del Sur.

ABSTRACT

The feasibility of converting sawmill residues in electricity through gasification was evaluated in two ejido sawmills, Rocheachi and Tatahuichi, in the Guachochi municipality of Chihuahua State. The area has a semi cold climate, with temperature and precipitation annual means of 10,6 °C and 800 mm, respectively; the tree cover is dominated by pine and pine-oak communities with *Pinus arizonica* and *P. duranguensis* being the main species used for logging. The residues flow was estimated and its chemical composition and heating value characterized. The selected technology was the fixed bed downdraft gasifier; the costs and specifications data were provided by a Chinese supplier. The main assumptions were: 1,3 kgDM/kWh, 80% plant factor, electricity output sold for street lighting at 80% of commercial price. The financial viability was evaluated through the configuration of (100, 200, 400 and 800) kW systems and three scenarios: base, optimistic and pessimistic. The effect of additional revenues from carbon credits sold at the voluntary market at 4, 5 and 6 US\$/tCO₂ was assessed. The internal rate of return (IRR) increased consistently with increasing the systems' capacity with the 800kW being the most economically attractive. Without carbon credits, the 100 kW system showed no positive values at any scenario whereas the 800 kW system was the only one with positive IRR in all the scenarios with a range of 3% to 13%; the additional revenues from carbon credits added 2,3 and 2,9% to the low and high scenarios, respectively. In the context of the study, the systems evaluated would satisfy the additionality criteria required by the carbon market.

KEYWORDS:

Electric energy, sawmill residues, gasification, feasibility.

INTRODUCCIÓN

Los residuos de la industria de la madera son considerables en los países en desarrollo, por lo cual sugieren un alto potencial para la generación de energía (Tomaselli, 2007). En la actualidad, la energía de la madera es competitiva en el

mercado, particularmente cuando se origina como residuo de la industria del procesado de la madera.

En México, los recursos bioenergéticos potenciales representan entre 54% y 81% de la oferta interna bruta de energía primaria y 10 veces su uso actual (Maser y Fuentes, 2006). En forma específica, la cantidad de subproductos de la extracción forestal y la industria maderera con potencial energético serían del orden de 3,6 millones de toneladas (peso seco)/año, equivalentes a 71 PJ/año (Ghilardi *et al.*, 2006). Esto corresponde a 2,3% de los recursos de biomasa del país.

Las emisiones totales de México ascienden a 643 millones de toneladas de CO₂e/año (INE, 2006). El uso de la bioenergía contenida en los residuos de industrias como los aserraderos, tiene potencial para contrarrestar emisiones de CO₂ de otros sectores, entre ellos el de uso del suelo, cambio de uso de suelo y silvicultura (USCUSA), el cual contribuye con 90 millones de toneladas de CO₂e.

Juárez *et al.* (2003) señalaron que en el estado de Chihuahua había un total de 335 aserraderos con una capacidad anual de 1,58 millones de m³/año. El potencial bruto de residuos generados por esta industria podría estar entre los (475 a 630) millones de m³/año, si se asume, con base en datos de Orta y Juárez (2000) y FAO (1990), que la eficiencia de conversión de trocería a productos primarios y secundarios se encuentra entre 60% y 70%.

La disposición de los residuos del asierre, que por décadas se ha tenido en los aserraderos de Chihuahua, ha sido de forma descontrolada en la mayoría de los casos. Aunque localmente no existen datos concretos sobre la contaminación de los aserraderos, entre los impactos

ambientales negativos se encuentra el arrastre a las corrientes de agua de lixiviados tóxicos, como el ácido tánico o taninos y material en partículas finas (EPA, 1999; Saha y Kaviraj, 1996; Brewer *et al.*, 2001). Otro impacto negativo son las emisiones de gases con efecto de invernadero por la descomposición anaerobia y la combustión incompleta que ocurren en la disposición de residuos comúnmente realizada en los aserraderos.

En términos de conversión energética de biomasa a electricidad, destaca el desarrollo tecnológico y comercial que ha tenido la gasificación, debido a su flexibilidad y relativamente alta eficiencia con respecto a las tradicionales por combustión (FAO, 2008). La tecnología de gasificación es actualmente la opción más apropiada para proveer de electricidad en sistemas pequeños, a comunidades y pequeñas industrias (Abe *et al.*, 2007). Los sistemas de gasificación, además de ser más eficientes, son más baratos, sus refacciones tienen mayor disponibilidad y las reparaciones se puede realizar *in situ* (Knoef, 2000).

En México, la tecnología de gasificación se encuentra aún en la primera fase de estudio, con el primer laboratorio en vías de implantación en el Instituto de Ingeniería de la UNAM (Aguillón, 2007; comunicación personal). El rezago tecnológico de México en materia de gasificación se atribuye en gran medida a la dependencia de los combustibles fósiles para satisfacer la demanda de energía. No obstante, en México no existen políticas públicas orientadas hacia el aprovechamiento de la bioenergía, ni un marco jurídico específico o incentivos fiscales particulares (De Buen y Aguillón, 2006).

Además de beneficios ambientales a nivel global y regional, el uso de biomasa, como fuente de energía renovable, tiene

impactos positivos locales en la generación de empleo, una necesidad igualmente crítica para el desarrollo sustentable de las comunidades serranas.

OBJETIVOS

1. Evaluar la viabilidad técnica, económica y financiera de sistemas de generación de electricidad a partir de los residuos en los aserraderos ejidales Rocheachi y Tatahuichi, municipio de Guachochi, en la alta Sierra Tarahumara, estado de Chihuahua, México.
2. Evaluar los beneficios económicos de los sistemas de generación de energía considerados en el estudio, derivados de una posible participación en el mercado de bonos de carbono.

METODOLOGÍA

Área de estudio

Los aserraderos ejidales Rocheachi y Tatahuichi, unidades objeto de estudio, se ubican en el municipio de Guachochi, al suroeste del estado de Chihuahua, a una distancia media de 350 km de la ciudad de Chihuahua, mediante los enlaces carreteros Chihuahua-Cuauhtémoc-Guachochi y Chihuahua-Parral-Guachochi (Figura 1).

En 2005, los ejidos Rocheachi y Tatahuichi contaban con poblaciones de 1799 y 1154 habitantes y 759 y 289 beneficiarios, respectivamente. La población se encuentra dispersa en alrededor de 30 localidades en cada ejido. Las localidades donde se ubican los aserraderos son Rocheachi (Rocheachi) y Hueleybo (Tatahuichi); según el Instituto Nacional para el Federalismo y el Desarrollo Municipal (INAFED, 2008), estas comunidades tenían en 2000 una población de 681 y 191 habi-

tantes; 14% y 18% eran derechohabientes de los sistemas de salud IMSS e ISSSTE; su escolaridad promedio es de 6,9 y 5,1 años y su analfabetismo de 7% y 11%, respectivamente. La primera se encuentra totalmente electrificada, mientras que la segunda se encuentra en proceso de electrificación y el aserradero se ha autoabastecido de energía por medio de planta generadora a diesel.

El clima del área es templado húmedo, clasificado como C(E)W₂(x), dentro del subgrupo de climas semifríos "C(E)" (García, 1990). La temperatura media anual es 10,6 °C, con extremas de -13,2 °C y 31,5 °C; se tiene un periodo de heladas de 217 días. La precipitación media anual en la cuenca (Región Hidrológica 10 – Sinaloa) es de 803 mm; la temperatura media oscila entre (5 y 12) °C. La vegetación está constituida por bosque de pino y bosque de pino-encino; en el primero predomina *Pinus arizonica* y *P. durangensis*. Entre las no pináceas destacan *Quercus rugosa*, *Q. sideroxyla* y *Juniperus deppeana*.

Evaluación técnica

Características de los aserraderos

Los aserraderos del estudio, Rocheachi y Tatahuichi, son similares en cuanto a su infraestructura y orientación de mercado; la tabla producida en el asierre primario se vende sin clasificar a madererías y les provee la mayor parte de sus ingresos. En 2006, los productos del asierre primario y secundario en Rocheachi y Tatahuichi, totalizaron 6 600 y 2 521 m³, respectivamente (Tabla 1).

Flujos de residuos combustibles

Se identificaron las unidades, su equipamiento, sus insumos y productos y el uso de la superficie en la zona del aserradero. Se tomaron muestras de aserrín y se determinó el contenido de humedad conforme a la metodología descrita por la American Society for Testing Methods (ASTM) en la norma E 872-82. Con la colaboración del Centro de Investigación en Materiales Avanzados (Cimav), se realizó un análisis elemental (C,H,O,N,S) en muestras de

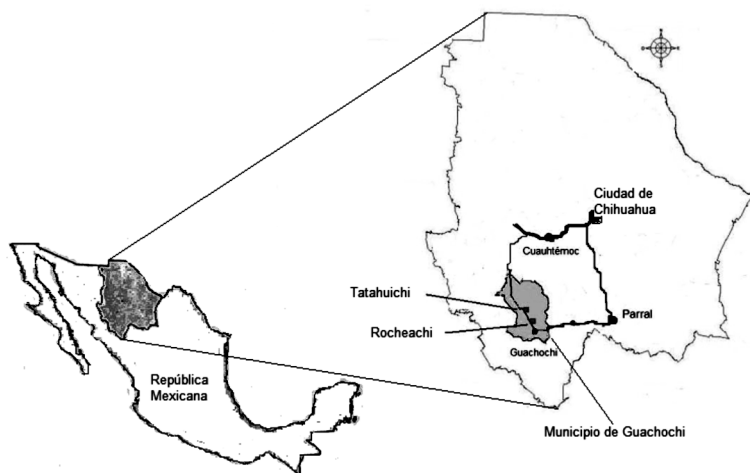


Figura 1. Localización del área de estudio: ejidos forestales Tatahuichi y Rocheachi, municipio de Guachochi, Chihuahua.

Tabla 1. Características técnicas de los aserraderos Tatahuichi y Rocheachi.

	<i>Rocheachi</i>	<i>Tatahuichi</i>
<i>Superficie total</i>	30 000 m ²	25,000 m ²
<i>Infraestructura</i>	1 aserradero principal 2 aserraderos diámetros menores Taller de secundarios (palilleras, tableteras)	1 aserradero principal 1 aserradero diámetros menores Taller de secundarios 1 astilladora 1 descortezadora (sin instalar)
Operadores en asierre primario	39	38
Operadores en asierre secundario	39	Sin datos
Fuente de electricidad	Red CFE	Motor diesel (en proceso de conexión a red CFE)
Tiempo en operación (años)	36	39
Capacidad de asierre diario (pie tabla)	9 000	9 000
Asierre total en 2006 (m ³) 1/	6 600	2 521

1/ Incluye primarios (tabla) y secundarios (reja, palillo, tarima y polín)

aserrín y corteza, y un Escaneado Diferencial Calorimétrico (DSC-TGA) (Price, 2006), a través del cual se determinó el contenido de compuestos orgánicos volátiles y carbono fijo en muestras de aserrín, con y sin corteza.

El valor energético superior (VES) en MJ/kg, se estimó con los resultados del análisis elemental, según la ecuación propuesta por Meraz *et al.* (2003) que expresa la aportación energética de los elementos carbono, hidrógeno, oxígeno, nitrógeno y azufre en función de su contenido porcentual en la biomasa, en base seca, de la siguiente manera:

$$\text{VES} = (1 - (\% \text{H}_2\text{O}/100))(-0,3708(\% \text{C}) - 1,1124(\% \text{H}) + 0,1391(\% \text{O}) - 0,3178(\% \text{N}) - 0,1391(\% \text{S}))$$

El coeficiente de asierre se estimó con base en muestras parciales, no estandarizadas, de trozas de diferentes diámetros en el asierre primario y de pedacería en secundarios como se muestra en la tabla 2. Los valores obtenidos se validaron por comparación con los de la literatura especializada.

Selección de la tecnología

A través de internet se recopiló información técnica y de costos sobre la tecnología de gasificación en sistemas a pequeña escala. Se estableció contacto con proveedores de China, Alemania y Estados Unidos. Los criterios más importantes considerados fueron el costo del equipo por kilowatt y la oferta de servicios adicionales para la instalación y arranque de una planta de gasificación.

Tabla 2. Muestras de aserrío realizadas en los aserraderos del estudio para estimar el coeficiente de aserrío

	<i>Cantidad</i>	<i>Volumen (m³)</i>	<i>Variables medidas</i>
ROCHEACHI			
Trozas	31	2,391/	Volumen aserrín y pedacería
Trozas	15	5,891/	Volumen nominal de tabla
Trozas	15	3,461/	Volumen de aserrín
Pedacería mayor	751 kg	--	Recuperación en kg de tableta, aserrín y pedacería
Tiras desorillado	460 kg	--	Recuperación en kg de palillo, aserrín y pedacería
TATAHUICHI			
Trozas	5	1,332/	Recuperación en kg de tabla, pedacería mayor, recortes y aserrín
Trozas	30	5,762/	Volumen y contenido de humedad de aserrín

La tecnología seleccionada para este estudio fue la de flujo hacia abajo de cama fija (downdraft fix bed), por ser la que produce menor cantidad de residuos de alquitrán. Las fases mayores del proceso se muestran en la figura 2.

Emisiones evitadas

La cantidad de carbono fósil sustituido por efecto de la generación de electricidad por medio de energía renovable se calculó conforme a lo siguiente:

Cantidad anual neta de energía producida (CANEP)= Cantidad total de electricidad producida – factor de consumo interno (5%).

CO_2 sustituido = (CANEP (kWh) * Factor de emisión para planta termoeléctrica a gas (0,6 tCO₂/MWh)) - emisiones del proceso (EP).

Las EP tuvieron los siguientes componentes:

1. emisiones de CO₂ por vehículos de transporte estimados por los factores

de emisión de 2,35 kgCO₂/l para gasolina y de 2,69 kgCO₂/l para diesel (EIA).

2. emisiones de CO₂e durante la instalación del sistema. Incluyen transporte aéreo, terrestre y electricidad. Para el transporte aéreo se consideró el factor de emisión de 0,110 kgCO₂/km/persona (Clean Air Conservancy, 2008).

El valor de los bonos de carbono fue asignado conservadoramente, según conceptos y rangos de precios para el mercado voluntario encontrados en informes recientes del mercado internacional de carbono (Kollmuss *et al.*, 2008; Capoor y Ambrosi, 2007).

Análisis económico y financiero

Los principales supuestos técnicos del sistema para el análisis económico se presentan en la tabla 3. La tecnología propuesta a utilizar es la gasificación de biomasa, con gasificador de tipo cama fija y flujo hacia abajo (fixed bed down-draft).

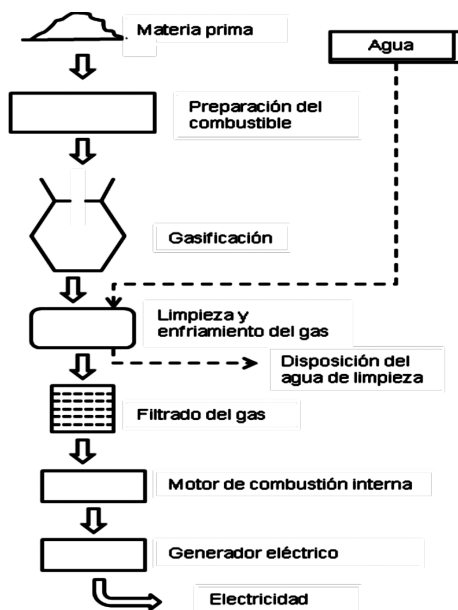


Figura 2. Secuencia de los principales procesos de la tecnología de gasificación seleccionada para el estudio.

Tabla 3. Principales variables y valores utilizados en el estudio.

<i>Variable</i>	<i>Valor</i>
Factor de planta	80%
Días laborados/año	335
Horas/día	24
Conversión de biomasa a electricidad (kg MS/kWh)	1,3
Contenido de humedad de la biomasa combustible (b.h.)	15-20%
Consumo interno de electricidad por el sistema	5%
Residuos sólidos (carbón, cenizas)	6%
Residuos de alquitrán y partículas	<20mg/m ³
Consumo de agua	6 m ³ /100kW
Rango de superficie ocupada por instalaciones	924-5,280 m ²
Tarifa CFE base para ingresos por ventas	80% de 5-A
Precio de venta de energía eléctrica en año 1	\$MX 1,53
Incremento en la tarifa CFE por encima de la inflación	1,45%
Incremento anual en consumo municipal	4%
Impuestos (IVA, reparto de utilidades, otros)	47%
Tipo de cambio (MX\$/US\$)	11,05
Costo anual de financiamiento	9%
Tasa anual de descuento	5%

El material combustible proviene de residuos de asierre de trozas sin descortezar y consiste en astilla y aserrín comprimido, cuya preparación consideró el tamaño y contenido máximo de humedad especificados por el fabricante del equipo. El diseño de las instalaciones contempla un área de producción (gasificador, motor y generador), un área administrativa (oficina), espacios para reserva y secado de combustible y patio para descarga temporal de residuos.

Los costos de equipo, flete, instalación y características técnicas (vida útil, mantenimiento, generación de residuos) se basaron en el proveedor con la mejor oferta. Las necesidades de mano de obra, espacios para el trabajo operativo y administrativo, y equipo complementario, fueron estimadas con base en la literatura y la experiencia personal. Las necesidades de fuerza de trabajo se ajustaron en forma decreciente al incrementar la capacidad de los sistemas. La mano de obra incluyó las prestaciones de ley, incluyendo la distribución de utilidades.

Se elaboraron flujos de efectivo en hoja electrónica Excel para sistemas de generación de electricidad configurados a las capacidades de 100, 200, 400 y 800 kW. Se asumió que las necesidades de materia prima adicional, para los dos

sistemas mayores, podrían ser satisfechas mediante la compra a otros aserraderos en la zona. Debido a la ubicación geográfica de los aserraderos del estudio, se asumieron dos zonas de abastecimiento según radios de 10 y 50 km.

Los indicadores financieros fueron el Valor Neto Actual (VNA), la Tasa Interna de Retorno (TIR) y la TREMA. La viabilidad financiera de las diferentes capacidades de sistemas de generación de energía eléctrica se definió con base en lo siguiente:

$$\text{TREMA} = \text{TIEE a 28 días} + 3 \text{ puntos}$$

donde:

TREMA = Tasa de Rentabilidad Mínima Aceptable,

TIEE = Tasa de Interés Interbancaria de Equilibrio (vigente al día).

Se evaluó la sensibilidad de la TIR de las cuatro capacidades de sistema (100 kW, 200 kW, 400 kW y 800 kW) a la modificación de cinco variables principales; el análisis de sensibilidad contempló tres escenarios: base, optimista y pesimista (Tabla 4). Adicionalmente, se integró el efecto de los posibles ingresos adicionales por venta de bonos de carbono a tres valores, (4, 5 y 6) US\$/tCO₂.

Tabla 4. Configuración de los escenarios para el análisis de sensibilidad

<i>Variable</i>	<i>Escenario optimista</i>	<i>Escenario pesimista</i>	<i>Escenario intermedio</i>
Factor de carga	85%	75%	80%
Costo de la materia prima	-10%	+ 10%	0% cambio
Tarifa 5-A CFE (porcentaje por arriba de la inflación)	1,8%	1,1%	1,45
Costo equipo gasificación instalado	-5%	+ 5%	0% cambio
Costo del financiamiento	8%	10%	9%
Precio de créditos de carbono (US\$/tCO ₂ e)	6	4	5

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Flujo y valor económico de los residuos combustibles

Los flujos de productos y residuos de los dos aserraderos se presentan en la tabla 5. Los valores encontrados para productos y subproductos estuvieron dentro de los rangos consignados por Juárez (2000), Orta y Juárez (2000) y Zavala y Hernández (2000), en estudios sobre coeficientes de asierre en México. La menor eficiencia en Tatahuichi se puede atribuir a un menor equipamiento para secundarios y al mayor deterioro de su equipo de asierre primario.

Valor económico de los residuos

La tabla 6 muestra una comparación entre los aserraderos del estudio en cuanto al uso y valor de sus residuos. Mientras que en Rocheachi, estos se quemaban, se regalaban o se vendían a

muy bajo precio, en Tatahuichi se obtenían beneficios económicos importantes. Desde hace dos años, este último ha estado descortezando las trozas y otros residuos y comercializando astilla y aserrín libres de corteza. Estos subproductos equivalen a 35% del volumen de trocería que ingresa a sus patios (Tabla 6). Se estimó que en el 2007, la venta de estos subproductos a la empresa Duraplay en Parral, Chihuahua, aportó a este aserradero arriba de 10% de sus ingresos totales. La demanda de residuos, particularmente descortezados, por parte de la industria de los tableros, ha abierto un mercado en esta zona del estado, lo que ha incrementado el valor de los residuos del aserradero considerados con potencial bioenergético. Por otro lado, en Tatahuichi no se tiene aún una forma de darle valor a la corteza, y su acumulación dispersa en los patios del aserradero resulta en un valor negativo; la maniobra para distribuirla en las zonas arboladas colindantes se estimó en \$40/t MS (Tabla 6).

Tabla 5. Productos y subproductos del asierre en los aserraderos Rocheachi y Tatahuichi en 2006.

<i>Producto</i>	<i>Rocheachi</i>		<i>Tatahuichi</i>	
	<i>m³</i>	<i>Porcentaje</i>	<i>m³</i>	<i>Porcentaje</i>
Productos primarios	5 577	51,2	2 521 ^{1/}	56,0
Productos secundarios ^{2/}	1 023	9,4	—	—
Pedacería mayor	1 532	14,1	—	—
Pedacería menor, capote	873	8,0	—	—
Aserrín	1 541	14,2	521	11,6
Tabla cero ^{3/}	343	3,2	—	—
Astilla	—	—	1 054	23,4
Corteza	—	—	405	9,0
Volumen total aserrado	10 889	100	4 501	100

1/ Incluye productos primarios y secundarios.

2/ Incluye reja, palillo, tarima y polín.

3/ Tabla defectuosa de desecho.

Tabla 6. Cantidad potencial de residuos combustibles en los aserraderos del estudio y su valor económico.

<i>Tipo de subproducto</i>	<i>t MS</i> ^{1/}	<i>Porcentaje</i>	<i>Valor (\$MX/t)</i>	<i>Uso</i>
ROCHEACHI				
Tiras de desorillado	735	38,8	\$ 50	Colectado por fleteros de la comunidad; vendido a intermediarios de la industria
Pedacería menor con corteza	419	22,2	\$ 0,0	Leña, disposición por quema en húmedo
Aserrín	740	39,0	\$ 37	Venta <i>in situ</i> a la industria, quema
Suma	1 894	100,0		
TATAHUICHI				
Astilla	547	52,4	\$ 391	Venta <i>in situ</i> a la industria
Aserrín	302	29,0	\$ 57	Venta <i>in situ</i> a la industria
Corteza	194	18,6	-\$ 40	Acumulado en patio
Suma	1 044	100,0		

^{1/} Derivado de tabla 4; se asumió una gravedad específica en verde de 0,48 (USDA-FS, 1979).

Los compradores de los productos secundarios son, por lo general, intermediarios de nichos del mercado regional y nacional. Se estimó que en los talleres de secundarios se procesa de 9% a 15% del volumen de trocería que ingresa a los aserraderos de Rocheachi y Tatahuichi, respectivamente. En este último, el valor total de las ventas anuales de estos productos fue de alrededor de 18% en 2006.

Impactos ambientales de los sistemas de gasificación

La producción de gas limpio en los sistemas de gasificación de biomasa es actualmente uno de los objetivos más importantes de la investigación a nivel mundial (Kwant y Knoef, 2004). Los principales contaminantes son: polvo y partículas finas (soot), alquitranes, metales

alcalinos y gases ácidos y alcalinos (Good *et al.*, 2005). La disposición de los alquitranes podría ser mediante reciclado al gasificador o incinerado; otras formas de disposición son inaceptables (Maniatis, 2001). Según las especificaciones técnicas del sistema seleccionado, cama fija y flujo hacia abajo (fixed bed downdraft), de la firma Chongqing Welluck, los residuos de alquitrán y partículas son del orden de <20 mg/m³ de gas producido, el cual se considera de los más bajos en sistemas comerciales.

Análisis financiero

La TIR se incrementó consistentemente al incrementarse la capacidad del sistema. El sistema a 100 kW no mostró resultados positivos en la tasa interna de retorno (TIR) en ningún escenario y se excluye en la figura 3, donde aparecen los resultados

para los sistemas 200, 400 y 800 kW. Hubo una diferencia redondeada de 14 puntos de TIR entre los sistemas de 200 y 800 kW en el escenario intermedio y de 12 puntos en el optimista. Dentro de cada sistema, la TIR tuvo una variación de alrededor de 10 puntos entre el escenario optimista y el pesimista. El sistema a 800 kW fue el único que tuvo una TIR positiva en los tres escenarios. Los resultados muestran claramente el efecto de economía de escala, sin embargo, tal efecto fue no lineal, ya que al duplicar la capacidad de (200 a 400) kW la TIR se incrementa casi nueve veces, pero solamente 0.35 veces al duplicarse la capacidad de (400 a 800) kW.

El sistema a 800 kW, bajo el escenario optimista, es el único que satisface la TREMA de 10%. De este modo, es el sistema que podría potencialmente operar con autonomía financiera en las circunstancias más favorables. Debajo de esta capacidad, sería necesaria la participación de fondos externos al proyecto.

Créditos de carbono

Debido a su flexibilidad y menores costos de transacción, el mercado volun-

tario es actualmente la alternativa más accesible para pequeños proyectos en países en vías desarrollo. Estos son típicamente pequeños proyectos de generación de energía renovable. Para el presente estudio, el mercado voluntario se consideró la opción más viable; el precio considerado US\$ 5/tCO₂e se ubica en la parte baja del rango referido por Green Markets International (2007).

Al integrar al análisis financiero la posibilidad de obtener los bonos del mercado voluntario, correspondientes a la sustituciones estimadas de combustibles fósiles, se contemplaron escenarios para las capacidades mayores, (400 y 800) kW, por ser estas las que presentaron mejores perspectivas económicas (Figura 4). El impacto de los bonos se reflejó en incrementos en la TIR de 1,1% a 1,6% en el sistema de 400 kW y de 2,3% a 2,9% en el de 800 kW. Como puede apreciarse, en este último los bonos de carbono, en los tres niveles de precio considerados, incrementaron la TIR por arriba de 10%, establecido como la TREMA para el análisis. Debido a esto, un proyecto de generación de electricidad con biomasa, bajo las condiciones descritas en este

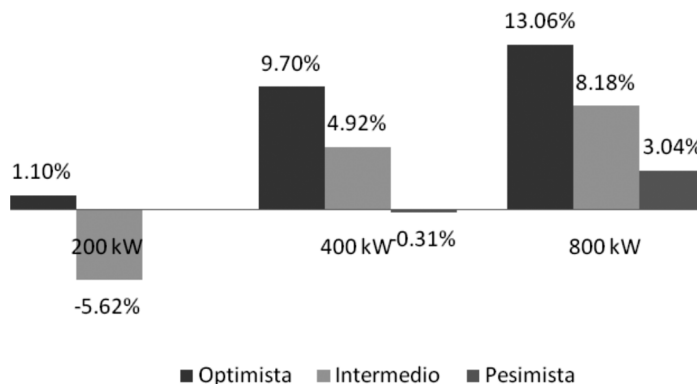


Figura 3. Valores de la TIR en tres escenarios y capacidades de sistema con al menos un valor mayor a cero.

estudio, cumpliría con el criterio de adicionalidad que se requiere en los Mecanismos de Desarrollo Limpio. Capacidades de 400 kW o menores requerirían contar, además de ingresos por bonos de carbono, de subsidios especiales, si su implementación es de carácter estratégico.

Otro indicador afectado favorablemente por los ingresos adicionales de la venta de bonos de carbono, es el tiempo para recuperar la inversión inicial. Nuevamente se tuvo un mayor impacto en los dos sistemas con mayor capacidad, (400 y 800) kW. En general, el tiempo para recuperar la inversión varió de 4,6 años en el sistema a 800 kW con bonos a 6 US\$/t CO₂, a más de 15 años en el sistema a 200 kW sin bonos de carbono. Dentro de cada sistema, el impacto de los ingresos adicionales por bonos de carbono tendió a incrementarse al pasar del escenario optimista al intermedio y al pesimista. En los dos sistemas mayores se observa una reducción máxima de 0,8 años en el escenario optimista a 1,7 y 2,5 años en los sistemas a (400 y 800) kW en el escenario pesimista.

Efecto de cada variable

La figura 5 muestra el efecto del cambio observado en la TIR por la variación en una unidad porcentual en las variables consideradas en los escenarios propuestos en este estudio. La variable más sensible fue sin duda el precio de venta; una variación de $\pm 1\%$ resultó con una oscilación de la TIR en 2,5 unidades porcentuales. Junto al precio de venta, las variables financiamiento y factor de planta son el grupo de variables con un segundo efecto más importante en la TIR. El costo de la materia prima mostró la menor sensibilidad de las cinco variables con alrededor de 0,1% de cambio por cada unidad porcentual de cambio.

El precio de venta se basó en la tarifa 5-A de la Comisión Federal de Electricidad para el alumbrado público. En los últimos 10 años esta tarifa se ha mantenido consistentemente entre 1 y 2 puntos porcentuales por arriba de la inflación. Este hecho refleja el sentido de la política oficial, tendiente a garantizar los resultados financieros positivos para el sector energético y es, por lo tanto, un aspecto que disminuye la incertidumbre natural en este tipo de proyectos.

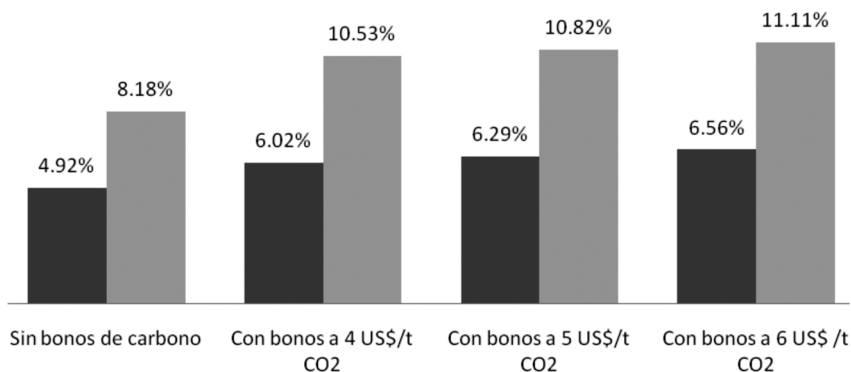


Figura 4. Tasa Interna de Retorno proyectada en el escenario intermedio para los sistemas de 400 y 800kW con y sin bonos de carbono.

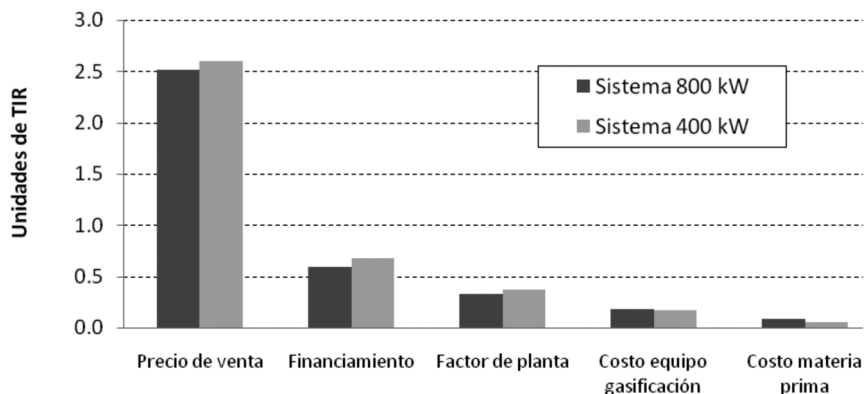


Figura 5. Oscilación entre los escenarios optimista y pesimista en unidades de TIR por cada unidad porcentual de cambio en las variables consideradas en el análisis de sensibilidad.

Costo de producción por kWh

Aunque en gran medida el contexto socioeconómico es un factor determinante de los costos de producción, este indicador permite comparar en qué medida la generación independiente de electricidad puede competir con otras fuentes de energía eléctrica. Los valores absolutos de los costos disminuyeron al incrementar las capacidades de los sistemas configurados. En cada uno de los tres escenarios simulados, los costos de la energía de la capacidad más baja (100 kW) fueron alrededor de 2,7 veces mayores que los de la más alta (800 kW) (Figura 6). Junginger *et al.* (2006), analizaron curvas de aprendizaje en plantas de cama fluidizada a nivel mundial y concluyeron que la economía de escala era el factor que mejor explicaba las reducciones de costos; los costos de electricidad disminuían entre 8% y 9% por cada duplicación de la producción de electricidad.

Faaij *et al.* (1998) compararon las opciones de biomasa y carbón en la generación de electricidad. El costo privado proyectado para 2005 fue de

€0,068 (US\$0,099) y 0,038/kWh (US\$0,099) (miliEuros/kWh) para biomasa y carbón, respectivamente. Sin embargo, si los daños externos y los beneficios cuantificados son incluidos, el rango de costos asciende a 53-70 mECU/kWh y 45-72 mECU/kWh para la biomasa y carbón, respectivamente fue de 1,4619.

Estructura de costos

La figura 7 muestra la participación porcentual de los diferentes rubros de los costos. Los activos productivos incluyen la inversión inicial en obra civil, equipo de gasificación y de transporte; los de interconexión comprenden las cuotas establecidas por la Comisión Federal de Electricidad por conexión y uso de la red alámbrica. La mano de obra es con mucho el insumo más importante en las cuatro capacidades consideradas en el estudio, con un promedio de 30%. Sigüentes en magnitud son los costos de financiamiento y materia prima con 16% y 13%, respectivamente. El diseño del proyecto contempla un amplio uso de mano de obra para el manejo, preparación y transporte de los combustibles biomásicos, así

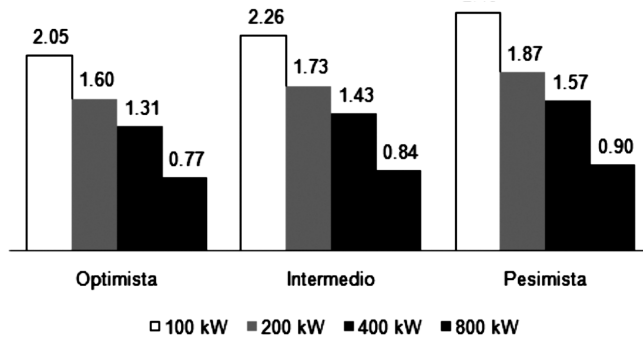


Figura 6. Costo de producción en MX\$/kWh en los tres escenarios de los cuatro sistemas del estudio.

como para la disposición de residuos. Sin embargo, es muy posible que los sistemas de 400 y 800 kW requieran equipo adicional para la carga y descarga de camiones, así como para la reubicación de inventarios y secado del material combustible. La figura 7 muestra que los costos de la materia prima, en caso de los dos sistemas mayores, tienen una alta participación de costos por mano de obra indirecta, un componente contemplado en la fase de transporte.

Los costos de mano de obra, tanto directa como indirecta, constituyen uno de los aspectos de mayor impacto positivo en el entorno socioeconómico de un proyecto de generación de electricidad por biomasa. En caso del sistema a 800 kW, el transporte llega a representar 50% del costo total de la materia prima. Al considerar esto, la derrama económica en mano de obra alcanza a comprender más de la tercera parte de los costos totales en caso de un sistema de 800 kW.

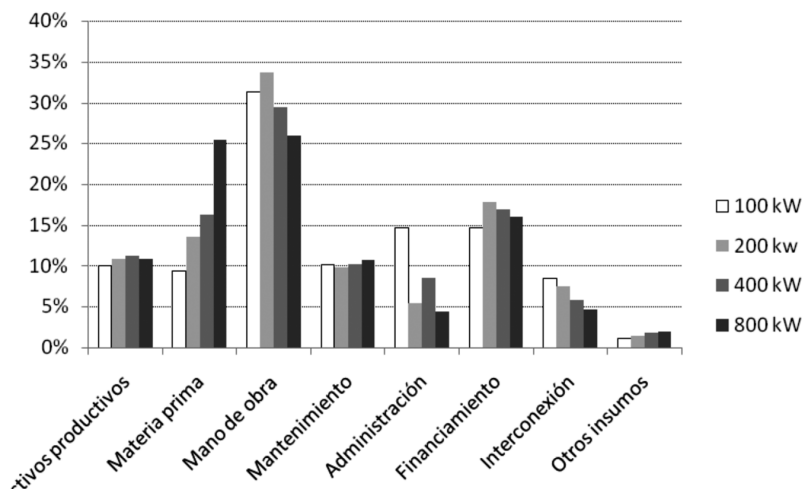


Figura 7. Estructura de costos para los sistemas de generación de electricidad.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

En esta zona del estado, con geografía característicamente accidentada, se considera viable la concentración de residuos de aserrío para la operación de una planta de generación de electricidad, con un rango de capacidad entre 400 y 800 kW. En virtud del evidente efecto de escala, una capacidad de 800 kW sería la más viable económicamente.

Se encontró que la TREMA es alcanzable si se consideran los ingresos adicionales que generarían los bonos de carbono, incluso a un precio de US\$ 4/tCO₂e, por el sistema a 800 kW en un escenario intermedio. Dado esto, un proyecto con estas características satisface el criterio de adicionalidad que demanda el mercado regulado de carbono. Se considera que el proyecto tendría mejores posibilidades dentro del mercado voluntario, donde la colocación de los bonos de carbono apoyaría con ingresos adicionales del orden de (4 a 6) US\$/tCO₂e y totales de US\$10,639 a US\$15,958 por año. Otro beneficio sería su impacto en la economía local a través del empleo que genera directamente en la operación de la planta e indirectamente en la maniobra y transporte del combustible biomásico.

En cuanto a los beneficios ambientales, un proyecto de conversión bioenergética de residuos como el presente, conllevaría la eliminación de prácticas con impactos ambientales negativos como la quema incontrolada y la disposición de residuos en condiciones que liberan contaminantes al agua y a la atmósfera. Algunos de esos impactos, como las emisiones de gases de invernadero por quema no controlada, pueden ser estimados e incorporados a la línea base del proyecto. Sin embargo, quedarían por resolver los posibles impactos

negativos causados por la operación de una planta de gasificación. En forma importante podrían ser los causados por la disposición de los residuos orgánicos (alquitranes) en las aguas de desecho, producto de la limpieza del gas de síntesis, así como de partículas en suspensión en el área de gasificación. En los primeros puede existir el riesgo de contaminación de agua y en el segundo caso un riesgo a la salud de los operadores. La búsqueda de soluciones es un tema principal de investigación. Por lo anterior, se recomienda revalorar mediante experiencias en campo con gasificación en pequeña a mediana escala, las tecnologías para el manejo de estos riesgos. Esta condición resulta imprescindible para la continuidad de un proyecto de esta naturaleza.

Los resultados encontrados indican que la generación de electricidad a partir de la biomasa de residuos de la industria del aserrío, tiene potencial para solucionar los problemas ambientales que actualmente ocasiona su disposición; contribuir a la mitigación del cambio climático y al desarrollo regional con una actividad económica que genera empleo para los habitantes de las comunidades forestales. Es necesario coordinar esfuerzos entre dependencias federales, estatales, municipales y académicas para la implementación de un proyecto piloto a nivel regional donde se validen la legislación y políticas que en materia de energía renovable ya han sido dadas a conocer por el gobierno federal.

RECONOCIMIENTOS

A la UACH y al PROMEP por la beca y apoyo financiero al primer autor para realizar estudios de doctorado. Al Conacyt-CIMAV, por las facilidades brindadas, en especial a la Dra. María Teresa Alarcón, el Dr. Alejandro Robau y la MC Miriam Moreno;

al despacho de servicios forestales del IAF Baldemar Beltrán B.; al C. Martín Solís, Presidente Municipal de Guachochi; al Ing. José Luis Ibarra N., de la Secretaría de Obras Públicas, Gob. del Edo. de Chihuahua y a las autoridades políticas y administrativas de los ejidos Rocheachi y Tatahuichi por los datos y facilidades aportados para la realización del estudio.

REFERENCIAS

- Abe, H., A. Katayama, B.P. Sah, T. Toriu, S. Samy, P. Pheach, M.A. Adams y P.F. Grierson. 2007. Potential for rural electrification based on biomass gasification in Cambodia. *Biomass and Bioenergy* 31:656-664.
- Brewer, D.T., S.J.M. Blaber, G. Fry, G.S. Merta y D. Efizon. 2001. Sawdust ingestion by the tropical shad (*Tenulosa macrura*, Teleostei: Clupeidae): implications for conservation and fisheries. *Biological Conservation* 97:239-249.
- Capoor, K. y P. Ambrosi. 2007. State and Trends of the Carbon Market 2007. World Bank, Washington, D.C. 45p. http://carbonfinance.org/docs/Carbon_Trends_2007_-_FINAL_-_May_2.pdf.
- Clean Air Conservancy. 2008. Air travel CO2 emissions. <http://www.cleanair-conservancy.org>.
- De Buen, R.O. y M.J.E. Aguillón. 2006. Estrategias para la promoción de la bioenergía en México. In: La Bioenergía en México. Un catalizador del desarrollo sustentable. Conafor, Red Mexicana de Bioenergía, A.C. Mundi-Prensa México. 119 p.
- EIA. Voluntary reporting of greenhouse gases program. Fuel and energy source codes and emission coefficients. <http://www.eia.doe.gov/oiaf/1605/coefficients.html>.
- EPA. 1999. Storm water management fact sheet. Non-storm water discharges to storm sewers. EPA 832-F-99-022. Washington, D.C. 5 p.
- Faaij, A.B., W. Meuleman, A. Turkenburg, A. van Wijk, Bauen, F. Rosillo-Calle y D. Hall. 1998. Externalities of biomass based electricity production compared with power generation from coal in The Netherlands. *Biomass and Bioenergy* 14:125-147.
- FAO. 1990. Conservación de la energía en las industrias mecánicas forestales. Forestry Paper 93. Roma. <http://www.fao.org/docrep/t0269e/t0269e08.htm>
- FAO. 2008. Forests and energy: Key issues. FAO forestry paper 154. 56p. <ftp://ftp.fao.org/docrep/fao/010/i0139e/i0139e00.pdf>.
- García, E. 1990. Carta de Climas. Atlas Nacional de México Instituto de Geografía, UNAM.
- Ghilardi, A.A., E. Riegelhaupt y F.R. Saldaña. 2006. Los recursos bioenergéticos de México. In: La Bioenergía en México. Un catalizador del desarrollo sustentable. Conafor, Red Mexicana de Bioenergía, A.C. Mundi-Prensa México. 119 p.
- Good, J., L. Ventress, H. Knoef, U. Zielke, P.L. Hansen, W. van de Kamp, P. de Wild, C. Coda, S. van Passen, J. Kiel, K. Sjöstrom, T. Lilliedahl, Ch. Unger, J. Neeft, M. Soumalainen y P. Simell. 2005. Sampling and analysis of tar and particles in biomass producer gases. Technical Report. CEN BT/TF 143. 44p. http://www.tarweb.net/results/pdf/Technical-Report-version-3_8-final.pdf

- Green Markets International. 2007. The Voluntary Carbon Market: Status & Potential to Advance Sustainable Energy. Arlington, MA. <http://www.green-markets.org/Downloads/vCarbon.pdf>.
- INAFED (Instituto Nacional para el Federalismo y el Desarrollo Municipal). Consultado en abril, 2008. <http://www.inafed.gob.mx>.
- INE. 2006. Inventario Nacional de Emisiones de Gases de Efecto Invernadero 1990-2002, México, Resumen Ejecutivo.
- Juárez, T.P. 2000. Las pérdidas causadas por el uso tradicional del sistema inglés de medición, aserraderos circulares y excesos de refuerzo. INIFAP-SAGAR.
- Juárez, T.P., F.J. Compeán, G., O.R. Armendáriz, A.H.O. Rubio, S.J. Hernández, R.M. Cano y S.M. Martínez. 2003. Identificación de los factores de ineficiencia en la industria de aserrío en Chihuahua. INIFAP-Conafor-Sagarpa. Folleto Técnico núm. 20. 27 p.
- Junginger, M., E. de Visser, K. Hjort-Gregersen, J. Koorneef, R. Raven, A. Faaij y W. Turkenberg. 2006. Technological learning in bioenergy systems. *Energy Policy* 34:4024-4041.
- Kollmuss, A., H. Zink y C. Polycarp. 2008. Making sense of the voluntary carbon market. A comparison of carbon offset standards. WWF-Stockholm Environment Institute-Tricorona. 119p. http://assets.panda.org/downloads/vcm_report_final.pdf.
- Knoef, H.A.M. 2000. The UNDP/World Bank monitoring program on small scale biomass gasifiers (BTG's experience on tar measurements). *Biomass and Bioenergy* 18(1):39-54.
- Kwant, K.W. y H. Knoef. 2004. Status of biomass gasification in countries participating in the IEA and GasNet activity. <http://gasnet.uk.net/files/289.pdf>.
- Maniatis, K. 2001. Progress in biomass gasification: an overview. European Commission, Directorate for Energy and Transport. 31 p. http://ec.europa.eu/energy/res/sectors/doc/bioenergy/km_tyrol_tony.pdf.
- Masera, C.O. y G.A.F. Fuentes. 2006. Estado actual de la bioenergía en México. In: La Bioenergía en México. Un catalizador del desarrollo sustentable. Conafor, Red Mexicana de Bioenergía, A.C. Mundi-Prensa México. 119 p.
- Meraz, L., I. Kornhauser y F. Rojas. 2003. A thermochemical concept-based equation to estimate waste combustion enthalpy from elemental composition. *Fuel* 82:1499-1507.
- Orta G.V.R. y T.P. Juárez. 2000. Cuantificación y clasificación de desperdicios generados en la industria de aserrío de la región de Bosque Modelo Chihuahua. SAGAR, Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias. Folleto Técnico núm. 13. 21 p.
- Price, D.M. 2006. Thermogravimetry. IPTME, Loughborough University. <http://www.sump4.com/downloads/TGA.ppt>.
- Saha, N.C. y A. Kaviraj. 1996. Acute and chronic toxicity of tannic acid and spent bark of cinchona to tilapia *Oreochromis mossambicus*. *Aquaculture* 145:119-127.

- Tomaselli, I. 2007. Forests and energy in developing countries. FAO, Rome. 32 p.
- USDA-FS. 1979. General Technical Report FPL 29. <http://www.fpl.fs.fed.us/documnts/fplgtr/fplgtr29.pdf>
- Zavala Z., D. y R. Hernández C.. 2000. Análisis del rendimiento y utilidad del proceso de aserrío de trocería de pino. *Madera y Bosques* 6(2):41-55.

Recibido el: 10 de febrero de 2010
Aceptado el: 17 de febrero de 2011

Este documento se debe citar como: Balderrama-Castañeda, S., C. Luján-Álvarez, D.K. Lewis, J.A. Ortega-Gutiérrez, B.H.J. de Jong y T. Nájera-Ruiz. Factibilidad de generación de electricidad mediante gasificación de residuos de aserradero en el norte de México. *Madera y Bosques* 17(2):67-84.