

GUATEMALA

SISTEMA ESTADÍSTICO Y GEOGRÁFICO PARA LA EVALUACIÓN DEL POTENCIAL ENERGÉTICO DE LOS RECURSOS BIOMÁSICOS EN LOS PAISES DEL SISTEMA DE INTEGRACIÓN CENTROAMERICANA

<http://www.wegp.unam.mx/sicabioenergy/Guatemala>

Documento preparado por Raúl Tauro, José Luis Caballero, Miguel Salinas y Adrián Ghilardi*

* Favor de dirigir toda correspondencia a este autor utilizando los datos de contacto proporcionados al pie de página.

PREFACIO

La Sede Subregional en México de la Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL), en colaboración con la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), se encuentran elaborando un Sistema Estadístico y Geográfico para la Evaluación del Potencial Energético de los Recursos Biomásicos en los países del Sistema de la Integración Centroamericana (SICA). El objetivo de la plataforma, actualmente en procesos de construcción (<http://www.wegp.unam.mx/sicabioenergy>), es que usuarios finales sin conocimientos técnicos puedan desplegar y consultar los potenciales de la bioenergía en los países del SICA, seleccionando 1) zonas geográficas de interés, 2) materias primas, 3) criterios de sustentabilidad, 4) tecnologías de transformación en calor, electricidad y/o combustibles, y 5) usuarios finales potenciales. A estas cinco funcionalidades, hemos agregado de manera emergente la capacidad de 6) optimizar la localización de centrales eléctricas a biomasa, y 7) la simulación espacio-temporal de la oferta y demanda de biomasa “tradicional” (i.e. leña y carbón vegetal para fines residenciales).

Los recursos biomásicos se organizaron en: 1) Forestal; a) subproductos del aprovechamiento y la industria forestal, b) plantaciones forestales dedicadas y c) aprovechamiento de bosques nativos, 2) Agropecuario; subproductos agrícolas, pecuarios y agroindustriales, 3) Cultivos dedicados, y 4) Residuos urbanos. La evaluación de los recursos en este reporte depende del acceso a información proporcionado por algún organismo oficial, preferentemente en formato *raster* o vectorial.

En este reporte se separan los potenciales de biomasa para calor y electricidad, llamados algunas veces “modernos”, de la demanda y disponibilidad actual y futura de leña y carbón vegetal “tradicional”. Son tres los motivos que nos llevaron a esta nueva configuración del informe: Primero, el uso extendido de biomasa residencial “tradicional” en los países del SICA, y el interés explícito de los funcionarios de esos países en que se considere como un tema prioritario. Segundo, el desarrollo previo por parte de la UNAM de métodos de modelación espacial prospectiva de la oferta y demanda de leña y carbón vegetal para usos residenciales o de pequeñas industrias, lo que abre la puerta a explorar no sólo potenciales técnicos de la bioenergía, sino a integrar el componente social de acceso a la energía; lo que se liga naturalmente con los objetivos de desarrollo sostenible y la agenda 2030 (aprobada por la Asamblea General de las Naciones Unidas). Tercero, la capacidad del modelo de simulación desarrollado por la UNAM de proyectar escenarios de oferta y demanda de leña al año 2030 y 2050 incorporado simultáneamente varios *drivers* de cambio de cobertura y uso del suelo, y la incertidumbre de los datos de entrada. En otras palabras, son los análisis de biomasa tradicional los que permiten construir escenarios espaciales robustos y con cierto grado de validación, mientras que los análisis de bioenergía “moderna” requerirían de un esfuerzo de investigación similar para cada recurso, que excede con creces los productos del presente estudio.

Por último, es primordial mencionar que la fuente original de la información proporcionada será citada en extenso en los metadatos de cada capa, tanto para la información original como para la procesada en potenciales bioenergéticos. Los metadatos son fácilmente accesibles en la plataforma mediante el símbolo de “i” al lado de cada capa o grupo de capas. Así mismo, el código web de la plataforma estará abierto para los fines que cada ministerio o secretaría participante requiera. La UNAM se compromete a albergar en equipos propios y dar mantenimiento a la plataforma hasta Diciembre de 2020 por lo menos; comprometiéndose también a colaborar en la migración de la plataforma a otro equipo, si esto fuera eventualmente necesario y a pedido de las dependencias nacionales interesadas.

CONTENIDO

Prefacio	2
Índice de Figuras	5
Índice de Tablas	5
Introducción.....	6
Inventario de la biomasa	9
Biomasa forestal	10
Subproductos del aprovechamiento y la industria forestal	10
Fuentes de producción	10
Consumo actual.....	11
Plantaciones forestales dedicadas.....	11
Fuentes de producción	11
Consumo actual.....	13
Aprovechamiento de bosques nativos.....	13
Fuentes de producción	13
Consumo actual.....	17
Biomasa de residuos agrícolas.....	18
Subproductos agrícolas, pecuarios y agroindustriales	18
Fuentes	18
Consumo actual.....	18
Cultivos dedicados	18
Fuente	18
Consumo actual.....	21
Metodología	21
Línea de base	22
Selección de la base espacial.....	22
Módulo de demanda	23
Módulo de oferta	25
Subproductos del aprovechamiento y la industria forestal	25
Plantaciones forestales dedicadas.....	25
Aprovechamiento de bosques nativos.....	26

Biomasa de residuos agrícolas.....	26
Subproductos agrícolas, pecuarios y agroindustriales	26
Cultivos dedicados	26
Residuos urbanos	27
Módulo de integración	27
Análisis del consumo actual	27
Oferta potencial PARA CALOR Y ELECTRICIDAD	29
Uso de leña y carbón vegetal: biomasa “tradicional”	29
INTRODUCCIÓN A MOFUSS	31
Modulo de demanda	32
Módulo de oferta	33
Módulo de oferta vs demanda: simulación dinámica de eventos de cosecha y revegetación del paisaje por crecimiento natural.....	34
Direcciones futuras de trabajo.....	35
Análisis prospectivo (escenario pesimista, tendencial y optimista) hacia 2030	36
Conclusiones genereales del estudio de caso	37
Bibliografía	38

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Composición de la oferta de energía primaria, 2016.	7
Figura 2. Áreas con potencial para plantaciones forestales	13
Figura 3. Distribución espacial de accesibilidad de biomasa aprovechable para energía y proveniente de bosques nativos.	15
Figura 4. Distribución espacial de accesibilidad de biomasa aprovechable para energía y proveniente de matorrales.	16
Figura 5. Distribución espacial de accesibilidad de biomasa aprovechable para energía y proveniente de mangle.....	17
Figura 6. Área potencial para el cultivo de caña de azúcar.....	19
Figura 7. Área potencial para el cultivo de palma de aceite.....	20

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Potencial energético de subproductos de la extracción forestal y la industria maderera	11
Tabla 2. Potencial teórico para la producción de madera para energía a partir de plantaciones de Acacia.	12
Tabla 3. Existencias y productividad de combustibles de madera provenientes de bosques naturales (potencial teórico).....	14
Tabla 4. Ejemplo del potencial técnico de biomasa proveniente de bosques naturales	14
Tabla 5. Potencial técnico para la producción de etanol y biodiesel.....	21
Tabla 6. Coeficientes preliminares para la conversión energética de diferentes recursos biomásicos. ..	24
Tabla 7. Demanda actual de biomasa en el sector eléctrico.....	28
Tabla 8. Potencial técnico total de recursos biomásicos para uso energético.	29

INTRODUCCIÓN

Evaluar la magnitud absoluta y la disponibilidad efectiva de los recursos de bioenergía es una tarea compleja debido a su amplia y dispersa distribución en el espacio geográfico, la producción estacional y el carácter más o menos perecedero de los mismos. Para lograrlo, es necesario desarrollar sistemas de información capaces de evaluar la disponibilidad de estos recursos, su localización geográfica, su régimen de propiedad y sus limitaciones de uso (por accesibilidad, condiciones legales o económicas). Por ello, se reconoce en general que el desarrollo de metodologías capaces de estimar las existencias reales y el potencial de producción es una primera prioridad en todo esfuerzo serio para promover el aprovechamiento sustentable de los recursos bioenergéticos.

La bioenergía es la principal fuente de energía renovable, se prevé que suministrará 60 EJ en el 2015 ([REN21, 2016](#)). La mayor parte de la bioenergía proviene de la biomasa sólida, donde el 65% se usa en el sector residencial para usos tradicionales, principalmente mediante tecnologías de baja potencia en zonas rurales y periurbanas. Alrededor del 35% restante se utiliza con tecnologías modernas, de mediana y alta potencia, para la producción de calor y, en menor medida, para generar energía eléctrica ([REN21, 2017](#)). La [IEA \(2012\)](#) predice un aumento en el uso de biocombustibles sólidos (BCS) a nivel mundial de 160 EJ para el 2050, de los cuales 100 EJ serían para generación de calor y electricidad; cubriendo de esta forma el 7.5% de la producción mundial de energía, el 15% de la demanda de calor industrial y el 20% de la calefacción residencial.

A nivel mundial el uso y la producción de la bioenergía ha ido en aumento en los últimos años, impulsada principalmente por países como Estados Unidos, Brasil y un emergente mercado asiático. El aprovechamiento y uso exitoso de la biomasa depende de ciertos factores como; el desarrollo del mercado, el acceso a los recursos biomásicos, la disponibilidad de tecnología, la existencia de políticas públicas y de entidades de certificación, y factores sociales, culturales y económicos. Para evaluar las posibilidades de uso de bioenergía en una región o en un país, es importante en como primer paso estimar el potencial y la disponibilidad espacial de diferentes recursos y, por otro lado, considerar el acceso a tecnologías maduras que permitan la transformación y uso eficiente de la biomasa, tanto en pequeña como en gran escala.

En Centroamérica y el Caribe la biomasa se emplea principalmente en tecnologías tradicionales para la cocción de alimentos y para calentar agua. En Haití, el 92% de la población depende del uso de biomasa en dispositivos tradicionales para estas tareas, mientras que en Honduras, Guatemala y Nicaragua, más del 50% de la población utiliza estas tecnologías ([REN21, 2017](#)). En Belice, el uso de bioenergía está conformado principalmente por el uso de leña en el sector residencial y en pequeñas industrias para la producción de tortillas y cal. De acuerdo con la Organización Latinoamericana de Energía (OLADE), en 2007 el 30,4% del consumo de combustible para cocinar en Guatemala, El Salvador, Honduras, Nicaragua y Panamá correspondía a leña, principalmente en zonas rurales (sólo superado por el GLP, que representa casi 65% del consumo de combustible para cocinar). Son muy pocos países los que utilizan tecnologías de mediana y alta potencia para la producción de electricidad con biomasa, o para uso de biogás y biocombustibles líquidos, como por ejemplo en Guatemala, República Dominicana y Nicaragua ([LCMEXL, 2017](#)).

La República de Guatemala tiene una superficie de 108.889 km², con una población que supera los 14 millones de habitantes. La leña predomina entre los recursos de energía primaria de la matriz energética nacional, teniendo una participación de más del 60% (Figura 1), según el reporte de la [CEPAL \(2018\)](#) y el [Balance Energético \(2017\)](#). La transformación de estos recursos primarios tiene lugar

principalmente en las centrales eléctricas, donde prevalecen las fuentes renovables, destacando la hidráulica y la biomasa, donde el biogás ha tenido un crecimiento exponencial en los últimos años. Las fuentes de energía fósil con mayor uso en sector eléctrico, son el carbón mineral, diesel y fuel oil, aunque este último tiene una tendencia negativa de uso. Los sectores económicos de mayor consumo de energía a nivel nacional son; el residencial, transporte e industrial. Existen objetivos nacionales que promueven el uso de biocombustibles en el país, principalmente para disminuir las importaciones anuales de gasolinas, resaltando la importancia de evaluar diferentes fuentes de biomasa como alternativas de producción de bioenergéticos.

Respecto a la disponibilidad de biomasa en Guatemala, son pocos los estudios que evalúan el potencial de bioenergía en el país, y menos aún los que analizan la distribución espacial del potencial por medio de Sistemas de Información Geográfica (SIG) como herramienta de análisis. Entre los trabajos más destacados se pueden destacar los siguientes:

- [\(FGV, 2018\)](#) evaluaron el potencial de biomásico para la producción de biocombustibles en Guatemala. Analizaron las siguientes especies: caña de azúcar, pasto elefante, palma africana y eucalipto, para la producción de bioetanol y biodiesel respectivamente. Se elaboraron mapas de atributos con diferentes variables agroclimáticas, con la finalidad de identificar las zonas con mejor potencial de producción para cada cultivo. Se generaron modelos de regresión lineal múltiple entre las variables y las coordenadas geográficas. Posteriormente se convirtieron los modelos en mapas por medio de un sistema de información geográfica, procesando las variables en formato *raster*.
- [\(INAB, 2016\)](#) presenta una comparación entre oferta y demanda de leña en el país aplicando la metodología de WISDOM. Concluye en que existe un déficit de leña en el país como resultado de una demanda (15 millones de toneladas de materia seca de leña) mayor a la oferta (10 millones de toneladas de materia seca de leña).

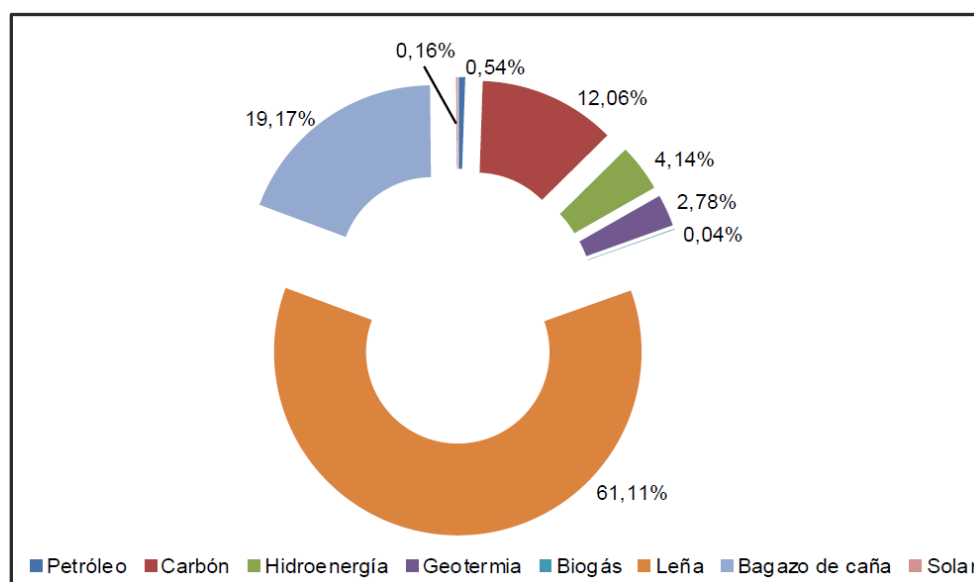


Figura 1. Composición de la oferta de energía primaria, 2016.
Fuente: CEPAL (2018).

Como se mencionó arriba, son pocos los estudios que hasta el momento utilizan SIG para el análisis espacial de la oferta y demanda de biomasa en Guatemala. Sin embargo, no existen estudios

espacialmente explícitos y con proyección a futuro, que integren la oferta de los recursos biomásicos más importantes para la producción de energía con la demanda anual de bioenergía en el país. Esta integración de oferta vs. demanda se presenta en una herramienta interactiva, montada en una plataforma web que permite la interacción dinámica por parte de los usuarios. Este reporte describe detalladamente los pasos empleados para obtener diferentes resultados mediante el uso de la plataforma. Asimismo, el reporte explica los alcances de la herramienta web para cada recurso biomásico considerado.

Actualmente, existen a nivel global diversas plataformas para consulta online del potencial de biomasa. Entre las más importantes podemos citar la del Centro de Desarrollo de Energías Renovables (CEDER - CIEMAT) de España, donde se desarrolló una [plataforma geoespacial](#) que permite estimar la disponibilidad de biomasa alrededor de un punto específico y los costos logísticos asociados. El National Renewable Energy Laboratory (NREL), del Departamento de Energía de los Estados Unidos, tiene mapas interactivos para biocombustibles líquidos ([BioFuels](#)) y para calor y electricidad ([BioPower](#)), que permiten consultar los potenciales por unidades administrativas de ese país y cuenta con un sistema georeferenciado de la ubicación actual de plantas de generación eléctrica. El Bioenergy Knowledge Discovery Framework (KDF), también del Departamento de Energía de los Estados Unidos, es una [plataforma de colaboración en línea y manejo de información](#) que proporciona acceso a información espacial y temporal (i.e. escenarios) sobre bioenergía en Estados Unidos. El grupo de investigación en energía del Instituto de Energía y Ambiente de la Universidad de São Paulo publica actualizaciones periódicas del [Atlas de Bioenergía de Brasil](#), un sistema dinámico de consulta. La National Sustainable Energy Authority de la República de Irlanda generó un [sistema de consulta en línea](#) sobre los potenciales espaciales de la bioenergía en ese país, con un diseño muy limpio y fácil de usar, que permite exportar la información consultada en múltiples formatos. La Asociación Europea de Biomasa (AEBIOM) ha desarrollado un [mapa relativamente interactivo](#) de limitada consulta, con ejemplos de instalaciones sobre bioenergía en Europa. El proyecto Basis_Bioenergy desarrolló una [plataforma web geoespacial](#) para evaluar el abasto futuro de chips y pellets en Europa para cualquier ubicación de interés. El sistema, además, permite consultar potenciales regionales de bioenergía y la competencia entre recursos, integrando criterios de sustentabilidad a la hora de calcular los potenciales.

La plataforma generada para el SICA y que se presenta en este reporte, cuenta con ciertos aspectos originales que no poseen las herramientas descritas anteriormente. Entre los más importantes se destacan: un Panel de Administración amigable para el usuario que permite la utilización y apropiación del sistema por terceros; una Interfase web para la simulación de escenarios prospectivos - (www.wegp.unam.mx); una Interfase de optimización de localización de centrales eléctricas; la comparación entre oferta vs demanda espacial de diferentes recursos biomásicos. Además, esta plataforma conjunta en una sola herramienta las siguientes opciones: selección de áreas y estadísticas de análisis en *raster*, criterios de sustentabilidad (filtros espaciales) y diferentes tecnologías de transformación de biomasa en energía 100% personalizables. Se obtiene de esta forma una herramienta de análisis alineada a las políticas energéticas del país, que permite apoyar a tomadores de decisiones, académicos, empresarios y todos aquellos interesados que deseen valorar el potencial de generación de bioenergía en el país.

El principal objetivo de este proyecto es generar estimaciones estadísticamente robustas, espacialmente explícitas, y con proyección a futuro, del potencial técnico de una serie de recursos biomásicos disponibles en Guatemala para la generación de calor y electricidad. Los recursos biomásicos a evaluar son: 1) Forestal: a) subproductos del aprovechamiento y la industria forestal, b)

plantaciones forestales dedicadas y c) aprovechamiento de bosques nativos, 2) Agropecuario: subproductos agrícolas, pecuarios y agroindustriales, 3) Cultivos dedicados, y 4) Residuos urbanos: sólidos, gaseoso y líquidos. Cabe mencionar que la integración de los diferentes recursos en la plataforma, y en consecuencia, en la explicación de este reporte, depende del acceso a información oficial (mapas) proporcionados por cada país.

Algunos de estos recursos ya se utilizan con fines energéticos en el país (e.g. leña por el sector residencial, carbón vegetal por el sector comercial, bagazo de caña en ingenios azucareros); y para otros usos no energéticos como alimento para ganado, abono para suelos, entre otros. Por esta razón, en algunos casos se contemplará la demanda actual de los recursos biomásicos, con el propósito de compararla y/o descontarla de los recursos disponibles. Una parte de los productos son modelos de simulación espaciotemporal que permiten comparar escenarios alternativos en cuanto a disponibilidad de recursos biomásico, su procesamiento, y posterior transformación en energía y uso final. En términos teórico-conceptuales se harán aportes en las áreas de manejo sustentable de recursos biomásicos y en el modelado espacio-temporal. Un compromiso esencial de este proyecto es la formación de recursos humanos para que los puntos de enlace de los países del SICA tomen la mayor independencia posible en cuanto al mantenimiento y actualización del sistema estadístico y geográfico.

Además del desarrollo de metodologías que nos permitan conocer cuáles son las existencias reales de los recursos bioenergéticos y su potencial de producción a escala de país, existe otra rama de investigación orientada a optimizar la oferta de biomasa. Básicamente se busca mejorar: 1) las prácticas de manejo de los sistemas de producción, recolección y distribución de la biomasa, y 2) las tecnologías de conversión de la biomasa en energía. Estos dos puntos incluyen una colección de “subtemas” de investigación tan variados como el desarrollo de sistemas de manejo multipropósito (principalmente agrícolas y forestales), la búsqueda de especies forestales promisorias o el desarrollo de tecnologías eficientes de conversión de la biomasa en energía. Aunque se reconoce la importancia de este tipo de estudios en una evaluación integral de los recursos bioenergéticos de Guatemala, no se han considerado en el presente estudio aspectos relacionados con este tema.

En este trabajo se realiza un análisis de las existencias actuales de recursos bioenergéticos en Guatemala. Se explora, además, el potencial técnico de las plantaciones forestales para energía. Es necesario resaltar que las estimaciones del equivalente de energía primaria de las diferentes fuentes de biomasa (potencial técnico) no contemplan ni los costos de producción (recolección, tratamiento, procesamiento, eficiencia de generación de energía, etc.) ni la competencia por usos ajenos a la producción de combustibles como, por ejemplo, la producción de alimentos u otros usos alternativos del suelo para el caso de las plantaciones forestales. La estimación del potencial real debe considerar tanto los costos de producción como el uso del suelo y los recursos para fines prioritarios con respecto a la producción de combustibles.

INVENTARIO DE LA BIOMASA

Los recursos de biomasa para energía comprenden una variada gama de fuentes primarias –es decir, aquellas en que la biomasa para energía se obtiene directamente con este fin- y secundarias –aquellas

fuentes en las que la biomasa para energía es un sub-producto de otras actividades económicas-. Entre las fuentes primarias destacan los bosques y selvas nativos, y las plantaciones o cultivos para energía. Entre las fuentes secundarias están los residuos del aprovechamiento y la industrialización de la madera, los residuos de cultivos agrícolas y los residuos agroindustriales, entre otros.

A nivel nacional, el principal recurso biomásico utilizado para fines energéticos proviene del sector forestal, principalmente de actividades de aprovechamiento forestal (fuentes primarias) y de centros de transformación primario de la madera (fuentes secundarias). En el sector agrícola, los residuos agrícolas y los agroindustriales (secundarios) se utilizan en las mismas agroindustrias sustituyendo combustibles fósiles para cogenerar calor y electricidad. Aunque no existe información sobre el consumo actual de biocombustibles líquidos en el sector transporte, existen en el país tierras que podrían ser aptas para la producción de cultivos dedicados, como por ejemplo, la caña de azúcar y la palma, para la producción de bioetanol y biodiesel respectivamente. A continuación, se explica en el reporte los diferentes potenciales energéticos que se pueden obtener con el uso de la plataforma web.

BIOMASA FORESTAL

De acuerdo con el Sistema de Información Forestal de Guatemala (SIFGUA), en el 2017 existió un volumen total aprovechado de madera aproximadamente igual a 2.5 millones de m³, dividido entre licencias autorizadas y exentos. La producción de trozas en áreas bajo licencia alcanzó los 151 mil m³, donde las principales especies aprovechadas son los Pinos y Encinos. Respecto a los aprovechamientos exentos de licencia se reparten entre 945 mil m³ en trozas y 1,170 m³ de madera aserrada.

Los bosques son vulnerables a las plagas y a los incendios forestales que anualmente afectan a miles de hectáreas. Estos fenómenos necesitan un control y manejo adecuado, que proporcionaría como resultado importantes cantidades de biomasa disponible para fines energéticos.

SUBPRODUCTOS DEL APROVECHAMIENTO Y LA INDUSTRIA FORESTAL

FUENTES DE PRODUCCIÓN

Se consideraron dos categorías generales: a) subproductos de la extracción forestal, que corresponden a los subproductos que se generan durante las prácticas de extracción de la madera comercial (en rollo), y está conformado por ramas, puntas y árboles con diámetros no comerciales, y b) subproductos de la industria maderera, que corresponden a los residuos que se generan principalmente en los aserraderos, principalmente aserrín, costeros, corteza, puntas y recortes.

El potencial técnico total de subproductos forestales se estimó en aproximadamente 10 PJ/año, de éstos, la mayoría corresponde a subproductos de la extracción forestal y una pequeña fracción a la industria maderera (Tabla 1). Es importante notar que estos últimos recursos, tienen una dispersión espacial mucho menor que los provenientes de bosques nativos. Esta diferencia debe ser considerada al plantear opciones de aprovechamiento energético y para evaluar las cadenas logísticas apropiadas para su uso final.

Tabla 1. Potencial energético de subproductos de la extracción forestal y la industria maderera

Tipo de recurso	Volumen de la producción forestal maderable o aserrada (Millones de m ³ r)	Coefficiente de generación de residuos (%)	Disponibilidad de residuos (Miles tMS/año)	Equivalente en energía primaria (PJ/año)
Subproductos de la extracción forestal	1.09	0.5	545	9.8
Subproductos de la industria maderera	0.01	0.5	5	0.1
TOTAL				9.9

CONSUMO ACTUAL

El principal producto que se aprovechan de los planes de manejo es la leña, destinada principalmente al sector residencial. No existen datos de la demanda actual de biocombustibles sólidos procesados (ejemplo, pellets o astillas) en tecnologías de pequeña o gran escala.

PLANTACIONES FORESTALES DEDICADAS

FUENTES DE PRODUCCIÓN

Para la estimación del potencial de plantaciones energéticas se incluyeron solamente las áreas de vocación forestal con vegetación secundaria, considerando que no es recomendable establecer plantaciones donde existen actualmente bosques, selvas u otros usos productivos del suelo. Se consideran de interés general las plantaciones de las siguientes especies: *Acacia mangium*, *Gmelina arborea*, *Leucaena leucocephala*, *Tectona grandis* y *Eucalyptus*. La metodología se basa en la clasificación de áreas según su aptitud para la producción de madera para energía (para más información ver la sección de [metodología](#)).

De acuerdo con las superficies obtenidas de los mapas a través de la plataforma web, se calcula la disponibilidad de madera para fines energéticos, obteniéndose un potencial teórico, que puede o no desarrollarse, a diferencia del potencial energético estimado para la industria forestal y los bosques nativos, que considera la existencia actual de los recursos y se entiende como un potencial técnico de disponibilidad inmediata.

En la Tabla 2 se muestra la diferencia entre los distintos potenciales energéticos que se pueden obtener por medio de la plataforma web. Para elaborar la tabla se tomó a modo de ejemplo la plantación de *Acacia*. Resultados similares se pueden obtener siguiendo los mismos pasos para las demás especies. En la primera fila se puede observar el potencial teórico máximo existente para todo el país (**1,346 PJ/año**), sin contemplar restricciones físicas de acceso a las plantaciones y sin considerar las áreas naturales protegidas. Para llevar estos potenciales a valores reales, la plataforma permite restringir la

oferta de biomasa seleccionando ciertos criterios de accesibilidad. Por ejemplo, si consideramos que la infraestructura es adecuada como para aprovechar el recurso biomásico que se encuentra en radios menores a 10 km de las localidades y a 3 km de las carreteras, obtenemos un potencial mayor a **866 PJ/año** (véase segunda fila Tabla 2). Por lo contrario, al excluir las ANP y las pendientes mayores a 10° en la plataforma, y seleccionando los criterios de accesibilidad mínima, obtenemos el potencial mínimo mostrado en la última fila de la Tabla. Considerando los mismos criterios de restricción, se pueden obtener los siguientes potenciales energéticos mínimos para cada especie; Gmelina (184 PJ), Eucalipto (326 PJ), Leucaena (195 PJ), Teca (225 PJ).

Tabla 2. Potencial teórico para la producción de madera para energía a partir de plantaciones de Acacia.

Potenciales	Superficie (Millones de ha)	Disponibilidad de madera para energía (Millones de tMS/año)	Equivalente en energía primaria (PJ/año)	Potencia eléctrica instalada (GWe)
Potencial máximo sin restricción	10.6	74.8	1,346	11.2
Potencial con accesibilidad máxima	7.4	48.1	866	7.2
Potencial mínimo	1.2	8.4	153	1.3

La disponibilidad de madera estimada en la Tabla anterior puede ser convertida en energía térmica o eléctrica mediante el uso de las cadenas logísticas de la plataforma. A modo de ejemplo, si consideramos el potencial mínimo (8.4 millones de tMS/año), podemos obtener una potencia eléctrica instalada de **1,269 MWe (1.3 GWe)**. Para llegar a este valor se consideró la transformación de la plantación en astillas, con un contenido de humedad del 30% y un coeficiente de aprovechamiento del recurso del 90%. Para la conversión energética se utilizó una eficiencia de planta del 30%, conversión energética del recurso de 5 MWh/tMS, factor de planta del 80% y factor de disponibilidad del 90%. Para más información ver la [Tabla 6](#) de la sección de metodología.

En la Figura 2 están representadas a modo de ejemplo, las áreas con potencial teórico para el establecimiento de plantaciones de Acacia en todo el país. Como se explicó anteriormente, el área seleccionada no contempla ninguna restricción física de acceso al recurso ni tampoco considera restricciones por uso de suelos. Se pueden ver tres categorías de productividades de acuerdo a los índices de aptitud del sitio (ver detalles en sección de Metodología), que van desde 0.7 hasta 31 tMS/ha/año. La suma de las superficies para cada índice de aptitud da el total de 10.6 millones de ha, como la correspondiente al potencial máximo estimado en la Tabla 2.

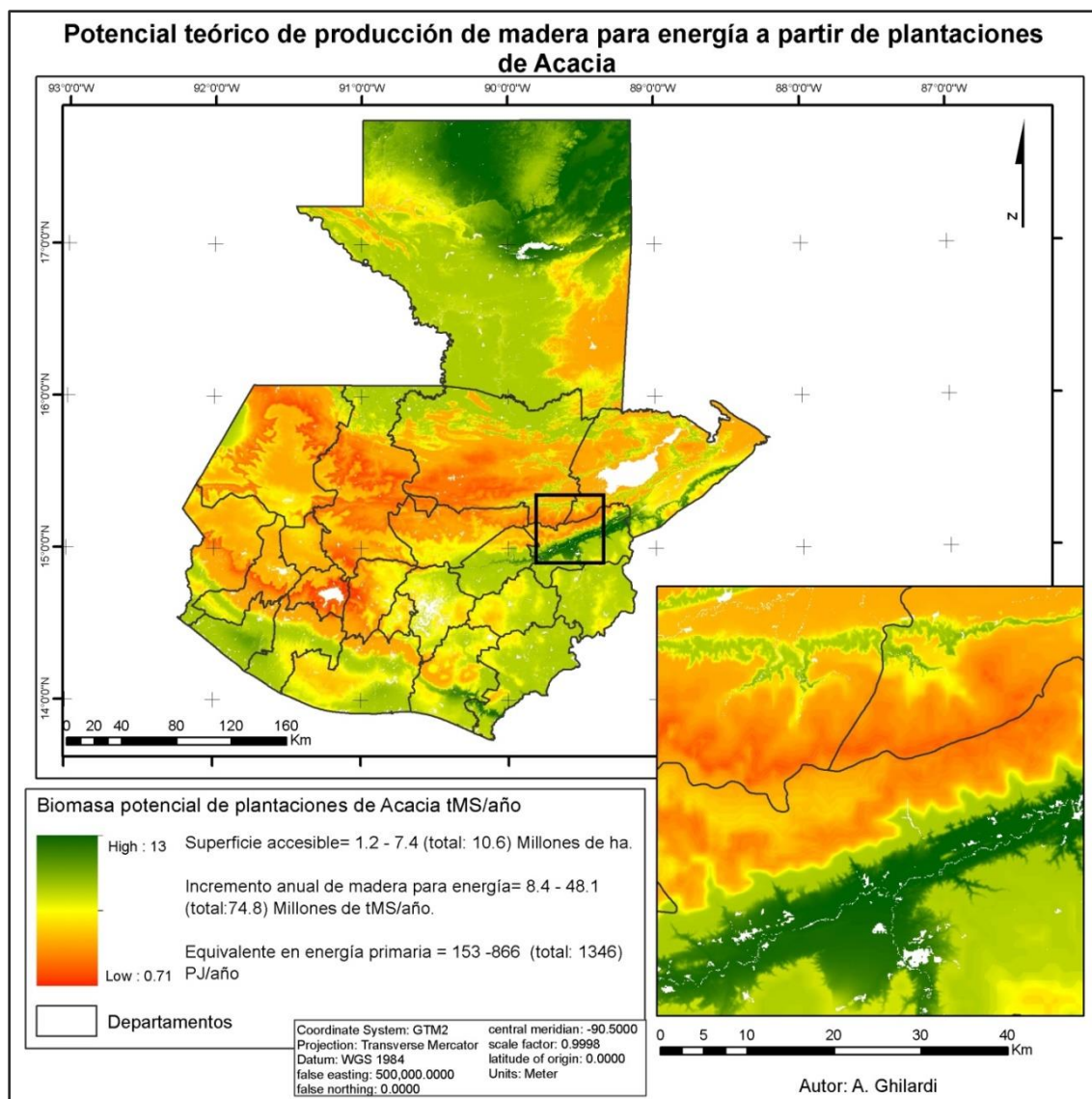


Figura 2. Áreas con potencial para plantaciones forestales

CONSUMO ACTUAL

La leña es el principal producto energético que se aprovecha de las plantaciones forestales en Guatemala. Existe poca información sobre la demanda actual de plantaciones con fines energéticos a mediana o gran escala.

APROVECHAMIENTO DE BOSQUES NATIVOS

FUENTES DE PRODUCCIÓN

Las fuentes de recursos actualmente incluyen a la biomasa leñosa (viva o muerta) directamente extraída de árboles y arbustos que crecen en bosques naturales y otras coberturas leñosas (por ejemplo, matorrales). Se deberían excluir las partes de los árboles y arbustos que se destinan a usos no

energéticos (madera para aserrar, para construcción, celulosa y papel, etc.), las cuales se deducen aplicando un coeficiente o factor de uso energético (FUE = biomasa apta solamente para energía / biomasa leñosa total). Este factor depende de las condiciones regionales de cada capa de vegetación analizada, por lo que se sugiere al usuario considerar y personalizar este factor en las cadenas de transformación de la plataforma. Se supone el uso energético de los bosques como complemento y no como uso exclusivo.

Existe un potencial muy importante en los bosques naturales que podría ser aprovechado con fines energéticos. Como referencia, el potencial máximo obtenido (212 PJ/año) podría sustituir más del 75 % de la demanda energética total del país en el año 2013 (48,900 kBEP - 279 PJ/año), según datos del [Balance Energético \(2017\)](#). En la Tabla 3 se detallan los potenciales teóricos para diferentes tipos de coberturas forestales. Este potencial no considera ningún tipo de restricción física de acceso a la biomasa. Sin embargo, es necesario considerar ciertas restricciones para el aprovechamiento del recurso, que convierte al potencial teórico en un potencial técnico (Tabla 4).

Tabla 3. Existencias y productividad de combustibles de madera provenientes de bosques naturales (potencial teórico).

Tipo de cobertura forestal	Superficie accesible (Millones ha)	Productividad promedio (tMS/ha/año)	Incremento anual de madera para energía (millones tMS/año)	Equivalente en energía primaria (PJ/año)
Bosque	3.6	1.8	6.7	122
Matorral	1.7	2.7	4.8	88
Mangle	0.02	6.0	0.1	2
TOTAL				212

Nota: el valor total puede no coincidir por el redondeo de cifras. Para datos exactos ver en la plataforma.

En la siguiente Tabla se puede apreciar el potencial técnico para los diferentes tipos de vegetación, que resulta de aplicar filtros al potencial teórico en la plataforma web. Se puede ver para cada tipo de vegetación un valor mínimo y otro máximo de superficie, obtenidas al seleccionar en la plataforma los criterios de accesibilidad. Por ejemplo, al partir del potencial teórico de Bosque (122 PJ/año, véase Tabla 3), se pueden seleccionar las opciones de accesibilidad mínima o máxima, obteniendo superficies entre 0.6 y 2.1 millones de hectáreas, que multiplicadas por la productividad de cada sitio resulta un potencial técnico que varía entre 19 y 69 PJ/año.

Tabla 4. Ejemplo del potencial técnico de biomasa proveniente de bosques naturales

Tipo de cobertura forestal	Superficie accesible (Millones ha)	Incremento anual de madera para energía (millones tMS/año)	Equivalente en energía primaria (PJ/año)	Ejemplo: potencia eléctrica instalada máxima (MWe)
Bosque	0.6 - 2.1	1.1 - 3.8	19 - 69	654
Matorral	0.4 - 1.4	1.3 - 3.8	24 - 69	661
Mangle	0.01 - 0.02	0.02 - 0.11	0.4 - 2	18
TOTAL			43 - 140	1,333

La disponibilidad de madera estimada en la Tabla anterior puede ser convertida en energía térmica o eléctrica mediante el uso de las cadenas logísticas de la plataforma. A modo de ejemplo, si consideramos las superficies accesibles máximas para cada vegetación y su producción de madera (3.8, 3.8, 0.1 millones de tMS/año respectivamente), podemos calcular la potencia eléctrica instalada total para bosques naturales, aproximadamente igual a **1.3 GWe**. Para llegar a este valor se consideró la transformación de los recursos en pellets, con un contenido de humedad del 10% y un coeficiente de aprovechamiento del recurso del 80%. Para la conversión energética se utilizó una eficiencia de planta del 30%, conversión energética del recurso de 5 MWh/tMS, factor de planta y de disponibilidad del 80 y 90%.

En las Figuras 3-5 se puede ver la distribución espacial de los tipos de vegetación a lo largo de todo el país. Se puede apreciar que predomina la existencia de bosques ampliamente distribuidos en el territorio. Para el aprovechamiento energético de este recurso, es muy importante considerar los costos asociados a su extracción y transporte. Estos costos dependen principalmente del acceso a tecnologías eficientes para la extracción de madera y de las condiciones de la infraestructura de caminos.

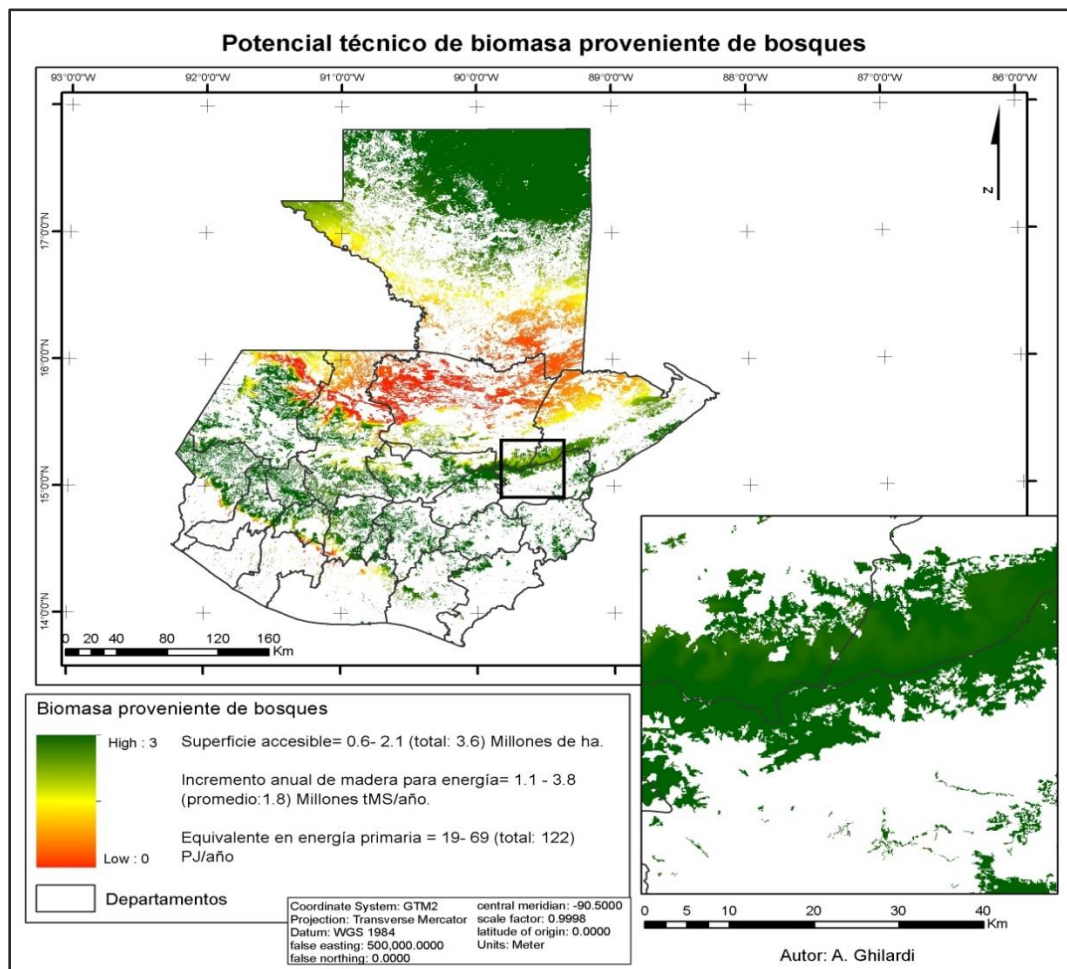


Figura 3. Distribución espacial de accesibilidad de biomasa aprovechable para energía y proveniente de bosques nativos.

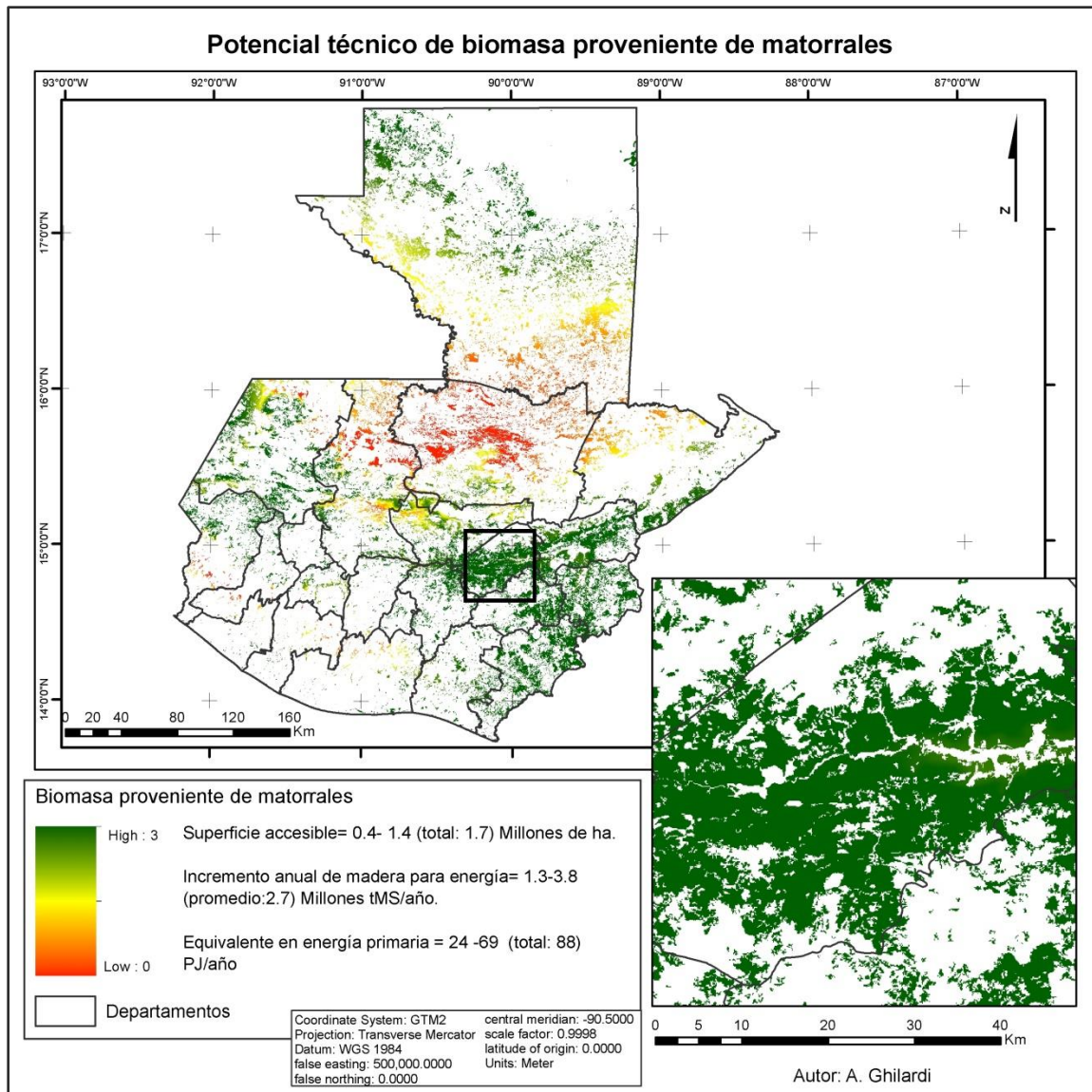


Figura 4. Distribución espacial de accesibilidad de biomasa aprovechable para energía y proveniente de matorrales.

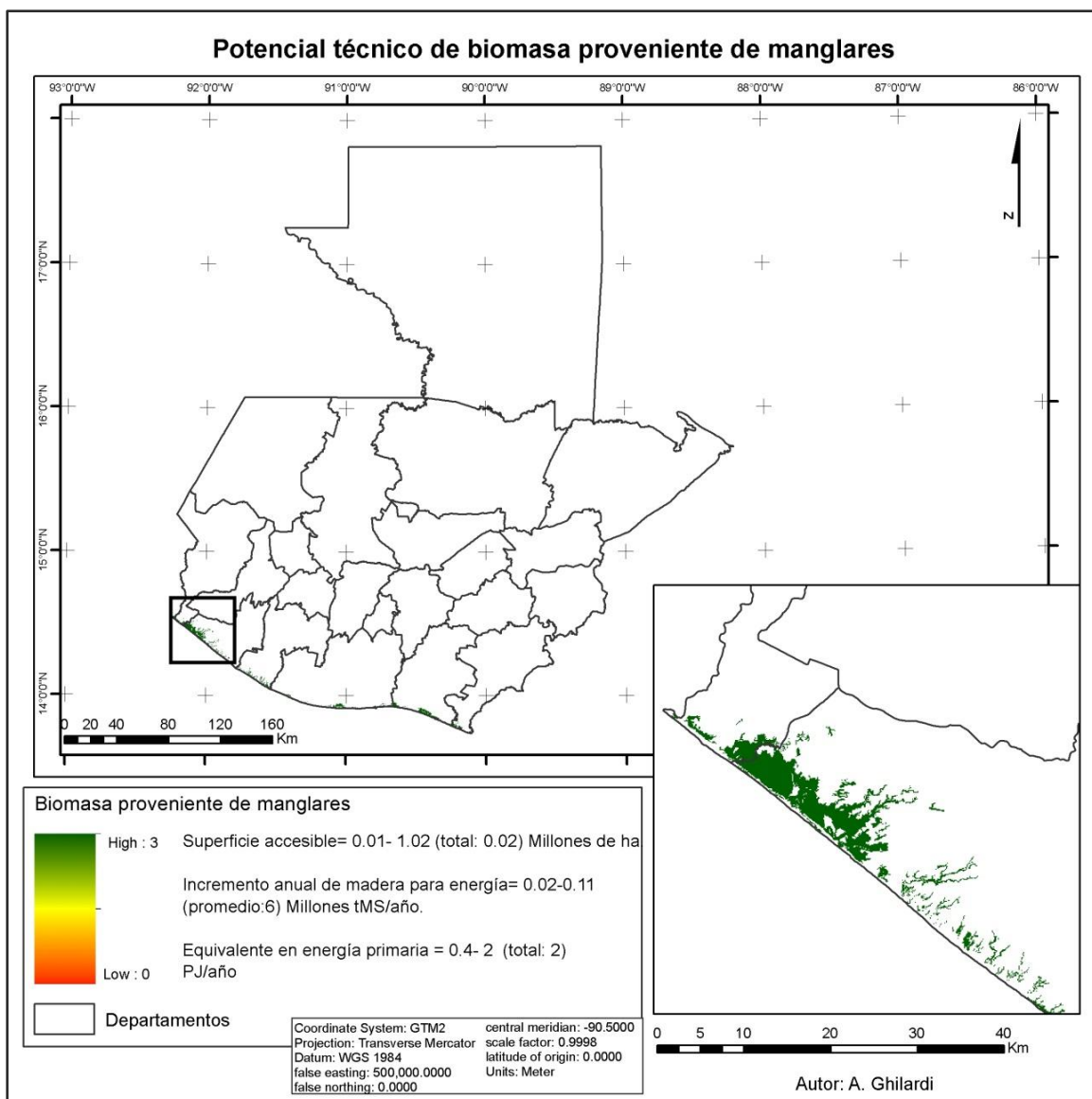


Figura 5. Distribución espacial de accesibilidad de biomasa aprovechable para energía y proveniente de mangle.

CONSUMO ACTUAL

La biomasa proveniente de los bosques nativos se utiliza principalmente para la producción de leña. Como se mencionó anteriormente, Guatemala tiene una gran dependencia de la leña para cubrir las necesidades energéticas del sector rural.

BIOMASA DE RESIDUOS AGRÍCOLAS

SUBPRODUCTOS AGRÍCOLAS, PECUARIOS Y AGROINDUSTRIALES

Un importante porcentaje de residuos agroindustriales se utilizan en el sector industrial para cogenerar o bien para generar electricidad para la red nacional de distribución. El principal recurso es el bagazo de caña de azúcar. Aunque actualmente no se cuenta con información sobre el potencial de energético de este recurso ni de su demanda, sería importante evaluar el potencial de producción de biogás por medio de residuos del sector pecuario, que podría ser utilizado para generar electricidad para autoconsumo o para interconexión. También sería importante considerar el potencial de los residuos agrícolas para la producción de calor industrial y/o electricidad.

FUENTES

No se cuenta con información sobre estos recursos.

CONSUMO ACTUAL

No se cuenta con información detallada.

CULTIVOS DEDICADOS

FUENTE

Se estimó el potencial de producción de etanol y biodiesel por medio de plantaciones dedicadas de caña de azúcar y de palma de aceite respectivamente. Al igual que en el sector forestal, se consideraron tres clases de productividad de los cultivos de acuerdo a la aptitud del terreno.

La caña de azúcar es uno de los principales cultivos en Guatemala. A pesar de que actualmente se está evaluando la factibilidad de producción de bioetanol a partir de los subproductos de la industria del azúcar (melaza), es importante evaluar la existencia de tierras disponibles que podrían ser aptas para aumentar el cultivo de la caña y aumentar la capacidad de producción de biocombustibles. Según el reporte del [FGV \(2018\)](#), Guatemala cuenta con 1.5 millones de hectáreas con clase de aptitud Alta y Apta (13% del territorio nacional) que podrían estar destinadas a la producción mecanizada de caña de azúcar.

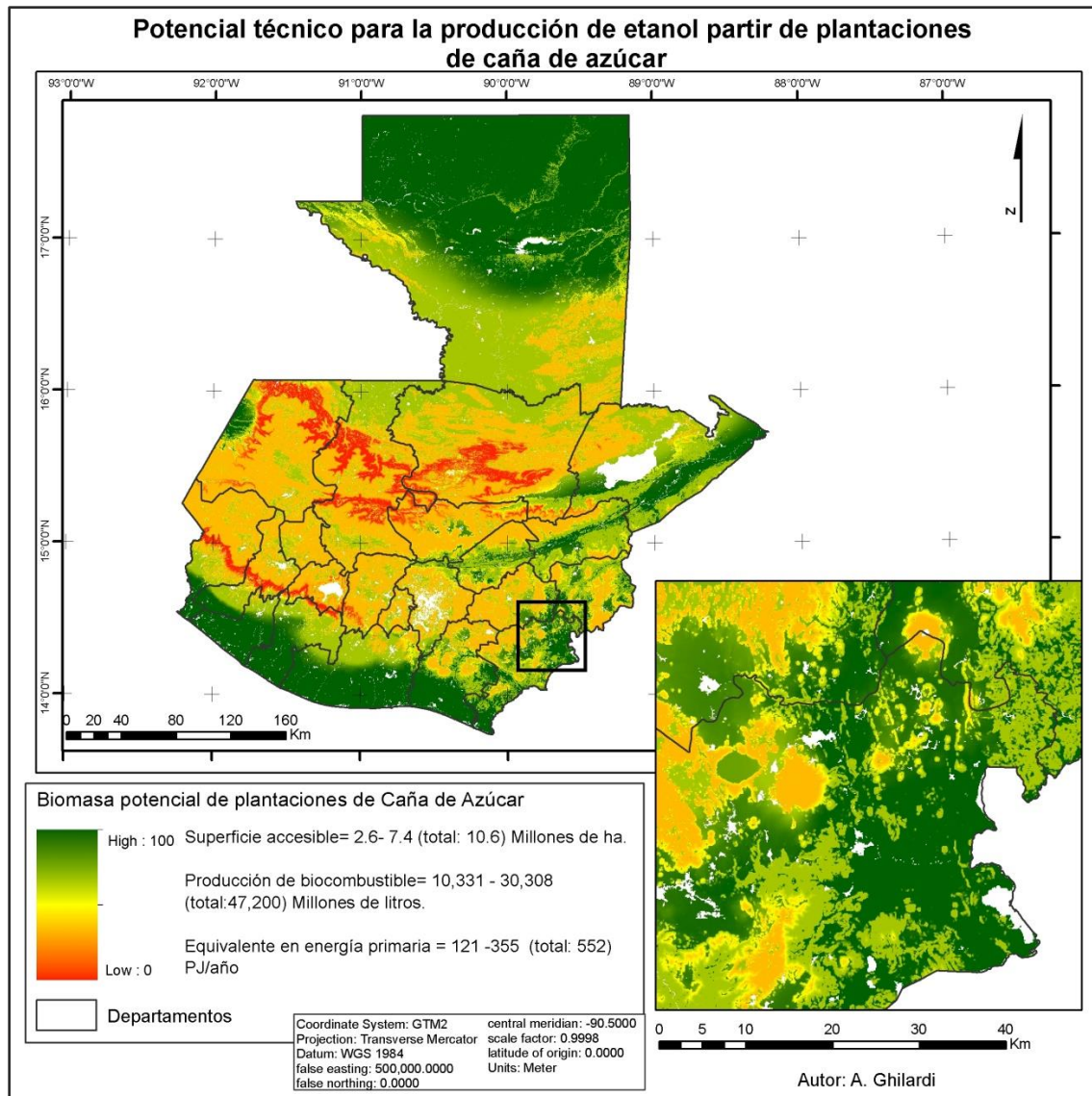


Figura 6. Área potencial para el cultivo de caña de azúcar

Existe interés de aumentar el uso de biocombustibles en la matriz energética nacional, específicamente el uso de biodiesel para sustituir el diésel de origen fósil. La palma de aceite es uno de los cultivos que posee mayor rendimiento de producción de aceite por hectárea. Aunque su uso es controversial debido a los impactos negativos que puede ocasionar al medio ambiente, si el cultivo se maneja adecuadamente, puede generar importantes cantidades de biodiesel. Aunque en la actualidad no se utiliza aceite de palma para la producción de bioenergéticos en Guatemala, en este estudio se consideró el análisis de tierras potencialmente disponibles para el cultivo de palma, como se muestra en la figura 7. El reporte del [FGV \(2018\)](#) considera que existen más de un millón de hectáreas con clasificación Apta, Aptitud moderada y Baja aptitud, para el cultivo de la palma.

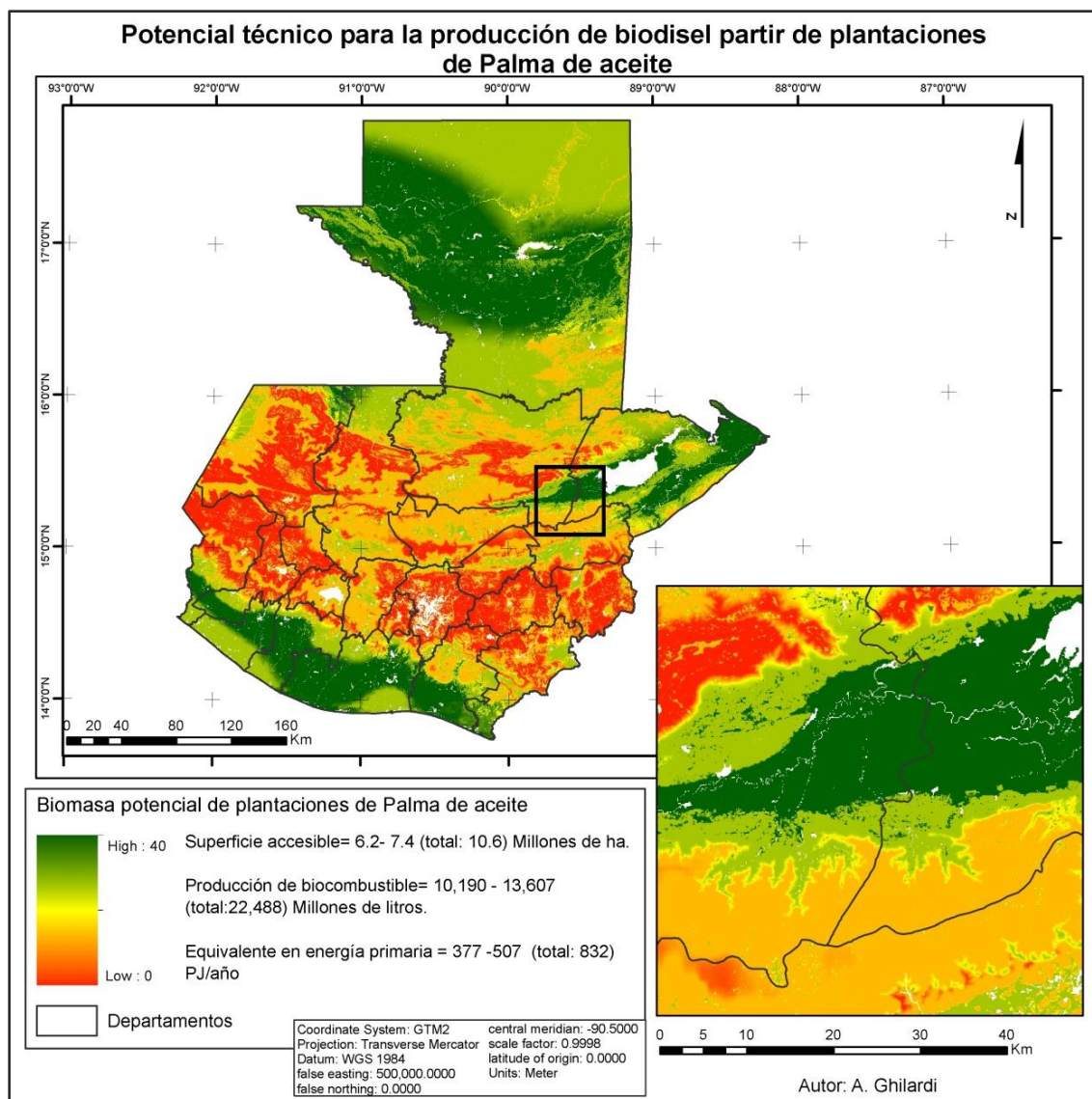


Figura 7. Área potencial para el cultivo de palma de aceite

En la Tabla 5 se resumen los potenciales de cada cultivo según las productividades, que varían de acuerdo al índice de aptitud del terreno y a los criterios de accesibilidad. A modo de ejemplo, la caña de azúcar tiene un potencial teórico máximo para producir 552 PJ/año de etanol. En la plataforma se pueden seleccionar filtros, como por ejemplo no considerar las ANP, con lo cual el potencial disminuye a 344 PJ/año. En el caso más conservativo, se puede restringir las ANP y las pendientes mayores a 10°, con lo cual se podrían producir más de **9,000 millones de litros de etanol**, con un equivalente energético igual a 227 PJ/año. La misma explicación aplica al cultivo de palma, que al considerar los criterios más conservativos se podrían producir aproximadamente **10,190 millones de litros de biodiesel**. El usuario final podrá reemplazar en la plataforma Web el cultivo de interés y estimar posteriormente la capacidad de producción de biocombustibles, modificando las variables presentadas en las cadenas de transformación de dicha plataforma.

Tabla 5. Potencial técnico para la producción de etanol y biodiesel.

Cultivo	Superficie accesible	Superficie potencial (millones ha)	Rendimiento promedio del cultivo según aptitud (t/ha)	Producción cultivo (millones t)	Producción de biocombustible (millones litros)	Equivalente energético (PJ/año)
Etanol						
Caña de azúcar	Sin filtro	10.6	63.7	674	23,600 *	552
	Máxima	7.4	57.2	420	14,720 *	344
	Mínima	3.4	56.7	277	9,683 *	227
Biodiesel						
Palma de aceite	Sin filtro	10.6	7.1	75	22,488	832
	Máxima	7.4	6.2	45	13,607	503
	Mínima	3.4	9.9	34	10,190	377

* Nota: El equivalente energético del cultivo de caña de azúcar considera que sólo el 50% de la producción estaría destinada a la obtención de etanol. La producción en litros se obtiene con las cadenas de transformación de la plataforma.

CONSUMO ACTUAL

En el país se produce bioetanol principalmente de la melaza, subproducto de la industrialización de la caña de azúcar. El mayor porcentaje de etanol es exportado (80%), mientras que el restante es utilizado en la industria de bebidas. Según la Asociación de Combustibles Renovables de Guatemala ([ACR, 2014](#)) actualmente existen 5 destiladoras de etanol en el país, con una capacidad instalada de 250 millones de litros anuales, suficiente para cubrir más del 10% de la gasolina utilizada en el sector transporte.

METODOLOGÍA

Los recursos biomásicos que se evaluaron en función de la disponibilidad de información fueron: 1) Forestal: a) subproductos del aprovechamiento y la industria forestal, b) plantaciones forestales dedicadas y c) aprovechamiento de bosques nativos, y 2) Cultivos dedicados. A continuación se detallan los pasos seguidos para la determinación del potencial energético en cada caso. Primero se explica cómo se genera la línea base de evaluación, posteriormente se describen los módulos de demanda y de oferta para cada rango de tecnología considerada, y finalmente se explica el módulo de integración, haciendo énfasis principalmente en el uso de leña a pequeña escala.

LÍNEA DE BASE

Para generar la línea de base de evaluación, es necesario completar y/o actualizar la información faltante en los siguientes casos:

Tabla 1: Faltan capas sobre ubicación y capacidad de producción de los centros de transformación de la madera, además de las zonas de aprovechamiento forestal con sus volúmenes autorizados.

Tabla 2: Falta actualizar la productividad promedio de acuerdo a las condiciones locales de crecimiento de las especies forestales. Es necesario contar con un mapa actualizado de suelos y referenciar las calidades de suelo con las condiciones de aptitud de las plantaciones.

Tabla 3: Ídem anterior para las diferentes coberturas vegetales.

Tabla 5: Faltan capas del cultivo de caña o de sus residuos, siendo la caña de azúcar uno de los principales cultivos de Guatemala. Referenciar las calidades de suelo con las condiciones de aptitud para los diferentes cultivos. Se puede actualizar la tabla con cultivos que se consideren de interés regional.

Faltan capas con información sobre los diferentes cultivos agrícolas en el país.

Faltan capas de la distribución de establos y sus producciones (o números de cabezas).

Faltan capas sobre rellenos sanitarios y sus respectivas capacidades.

SELECCIÓN DE LA BASE ESPACIAL

La base de datos espacial seleccionada varía conforme a los diferentes recursos biomásicos, debido sobre todo al formato en que viene la información original sobre la distribución de materias primas, y también en función de otras variables espaciales que se utilizan para afectar estos recursos. Por ejemplo, los mapas de biomasa aérea son generalmente mapas raster (celdas cuadradas) de entre 30 y 100 metros de lado (i.e. de resolución) mientras que la información de producción agrícola viene generalmente por unidades administrativas como estados, departamentos o municipios (polígonos vectoriales). Los residuos urbanos, por ejemplo, generalmente se presentan en formato vectorial, pero de puntos en vez de polígonos, que representan los lugares puntuales de origen. La información original muchas veces no viene en un formato espacial propiamente dicho, sino que se presenta en tablas desagregadas en el mejor de los casos haciendo referencia por sitios que pueden tener una representación espacial pero que para lograr su espacialización efectiva y representación en forma de mapas deben integrarse con capas espaciales existentes. El caso más común es cuando las tablas de información vienen listadas por unidades administrativas o estadísticas de las cuales se cuenta con el “mapa base”. Si por el contrario, no se tiene datos espaciales sobre las unidades a las que las filas de la tabla en cuestión hacen referencia, es necesario o bien producir el mapa vectorial para que “empate”, o agrupar las filas con la fortuna de que varias unidades no mapeadas coincidan con alguna otra unidad mapeada: por ejemplo, si uno cuenta con un mapa solamente de provincias, pero a información tabular

está por municipios, será necesario entonces sumar la producción municipal por cada Provincia del mapa a fin de que hay coincidencia y esta pueda ser mapeada.

En el caso del presente reporte, pero sobre todo de la geo-plataforma del SICA, la base espacial de cada recurso se reconoce de manera implícita durante el despliegue de la información y en los metadatos de cada recurso primario y sus vías de transformación en energía.

MÓDULO DE DEMANDA

La demanda actual de biomasa en Guatemala está diferenciada en dos grandes sectores y tipos de tecnologías. La demanda del sector residencial/comercial, caracterizada principalmente por medio de tecnologías de pequeña potencia, y la demanda de mediana y alta potencia, referida al sector industrial y a la generación de energía eléctrica. En la plataforma web se ha realizado esta clasificación, pudiéndose visualizar en el panel izquierdo las capas de oferta y demanda para cada escala de potencia mencionada.

Aunque actualmente la mayor demanda de bioenergía en el país es por medio del uso de leña en el sector residencial y de pequeñas industrias, existe un interés creciente por el uso de biomasa en el sector industrial y eléctrico. Cada vez son más las empresas, principalmente agroindustrias, que quieren aprovechar sus residuos para la producción de vapor de proceso y la cogeneración. Actualmente, el sector eléctrico utiliza biomasa, principalmente bagazo de caña de azúcar, para generar electricidad para autoconsumo o para interconectarse con la red eléctrica nacional. A continuación se explican las fórmulas utilizadas para estimar la demanda de biomasa, principalmente para tecnologías de mediana y alta potencia.

Para estimar la demanda de biomasa para usos térmicos y eléctricos se utiliza la siguiente ecuación:

$$Db = \left(\frac{P * H}{Ef / 100} \right) * PCI \quad (1)$$

Dónde: Db es la demanda de biomasa en equivalente energético (PJ/año); P es la potencia instalada de la planta (MW); H son las horas anuales de trabajo (horas/año); Ef es la eficiencia de planta (%); PCI es el poder calorífico inferior de la biomasa utilizada como combustible en la planta (GJ/tMS).

Para estimar la demanda actual de biomasa del sector eléctrico, se parte del registro de centrales generadoras del Ministerio de Energía y Minas ([MEM, 2017](#)), que detalla la potencia instalada de cada instalación en MW. Para determinar la energía anual generada se considera un factor de carga del 80%, factor de disponibilidad del 90% y la eficiencia de planta del 30%. Para estimar el consumo anual de biomasa se contempla un factor de conversión de 4.2 MWh por tMS. Para convertir las tMS a su equivalente energético en PJ se consideró un PCI igual a 15 PJ por millón de tMS para los residuos agroindustriales, y un PCI de 18 PJ por millón de tMS para los recursos forestales.

La eficiencia de planta es una variable que depende de las condiciones del combustible empleado, de la tecnología utilizada, de la eficiencia de la caldera, de la turbina, del generador, entre otros. En la tabla 6

se pueden ver las eficiencias más comunes, tomadas como referencia para este trabajo, de acuerdo al tipo de planta y al recurso usado como combustible. Estos coeficientes también son utilizados en la plataforma para las cadenas de transformación de los recursos.

Tabla 6. Coeficientes preliminares para la conversión energética de diferentes recursos biomásicos.

Recurso	Vector energético	CH inicial (%)	CH final (%)	Uso final	Eficiencia planta (%)
Cítricos	Cáscara de cítricos	85	30	Producción vapor de proceso	70
Forestal	Astilla – Pellet	50	10	Producción vapor de proceso	85
Caña de azúcar	Bagazo	50	40	Cogeneración	78
Forestal	Astilla	50	35	Cogeneración	85
Forestal	Pellet	40	10	Cogeneración	85
Forestal	Astilla	50	35	Electricidad	30
Forestal	Pellet	40	10	Electricidad	30
Forestal	Leña	50	40	Calefacción	70
Forestal	Astilla	50	35	Calefacción	80
Forestal	Pellet	40	10	Calefacción	90
Forestal	Leña	50	40	Cocción	18
Forestal	Astilla	50	35	Cocción	30
Forestal	Pellet	40	10	Cocción	30

En la tabla anterior se puede ver la eficiencia general de la planta en forma resumida. Para cálculos más detallados, se puede determinar la potencia que podría ser instalada en función del potencial energético de los recursos biomásicos, por medio de las siguientes ecuaciones según el tipo de tecnología empleada:

- Para generación térmica o eléctrica a partir de biogás utilizando un motogenerador

$$P = \frac{Pb * Efm * Efg}{Fp * t} \quad (2)$$

Dónde: P es la potencia que se podría instalar (MW); Pb es el potencial energético de cada recurso biomásico (MJ/año); Efm eficiencia del motor (%); Efg eficiencia del generador (%); Fp es el Factor de carga o de planta; t es el tiempo en segundo por año. Para el caso de potencia térmica se reemplazan las eficiencias eléctricas (Efm y Efg) por la eficiencia de caldera.

- Para generación térmica o eléctrica a partir de biocombustibles sólidos considerando un ciclo Rankine

$$P = \frac{Pb * Efc * Eft * Efg}{Fp * t} \quad (3)$$

Dónde: P es la potencia que se podría instalar (MW); Pb es el potencial energético de cada recurso biomásico (MJ/año); Efc eficiencia de la caldera (%); Eft eficiencia de la turbina de vapor (%); Efg eficiencia del generador (%); Fp es el Factor de carga o de planta; t es el tiempo en segundo por año. Para el caso de potencia térmica se eliminan las eficiencias eléctricas (Eft y Efg).

MÓDULO DE OFERTA

Para estimar el potencial de biomasa apta para uso energético, se utilizó un Sistema de Información Geográfica (SIG) para el procesamiento de la información geo-estadística. En base a la superficie accesible y a la aptitud del terreno, se calculó el potencial técnico para el aprovechamiento de los recursos biomásicos. Se utilizaron mapas e información existente de la producción anual y se la afectó por la productividad o por un coeficiente de generación de residuos para obtener el potencial energético de dichos recursos.

SUBPRODUCTOS DEL APROVECHAMIENTO Y LA INDUSTRIA FORESTAL

El volumen de la producción forestal maderable se obtuvo del Sistema de Información Forestal de Guatemala (SIFGUA), considerando el volumen de aprovechamiento de madera para la producción en trozas, obtenida en metros cúbicos rollo (m³r) para el año 2017. El volumen de madera aserrada considera la proporción de la producción o extracción forestal que se destina a la industria del aserrío, siendo obtenida del (SIFGUA). Los coeficientes de generación de residuos corresponden a: a) la fracción de la extracción forestal que puede ser utilizada con fines energéticos y b) la fracción de la madera que se pierde como residuos de los aserraderos. Para ambos casos se consideró un coeficiente de generación de residuos promedio igual a 0.5, una densidad media de la madera de 0.5 tMS/m³ y un contenido energético promedio de 18 Gigajoules/tMS.

PLANTACIONES FORESTALES DEDICADAS

El potencial de biomasa para las plantaciones se obtuvo utilizando un método multicriterio ligado a un SIG, mediante el cual se calculó un índice de aptitud basado en 4 criterios claves que determinan la calidad de un sitio para el establecimiento de plantaciones energéticas. Los criterios clave utilizados fueron: 1) coberturas con vegetación secundaria; 2) pendientes menores a 10° (el programa utilizado trabaja con ángulos); 3) superficie accesible físicamente alrededor de localidades y al costado de carreteras principales; y 4) precipitación total anual. Se utilizaron las capas de cobertura del geoservidor de la [Secretaría de Planificación y Programación de la Presidencia](#).

Se obtuvieron superficies con valores de índice variable entre 0 y 1, indicando diferente potencial para el establecimiento de plantaciones forestales. Valores cercanos a 0 indican potencial bajo, y valores cercanos a 1 indican las mejores condiciones de aptitud para las plantaciones, resultando en un potencial elevado. Las variaciones en el potencial (por ejemplo, calidad del sitio para el establecimiento y desarrollo de plantaciones) se ven reflejadas en las tasas de productividad esperada para los cuales se utilizaron valores de productividad mínimos y máximos (considerando las categorías dentro del método multicriterio). Los valores de productividad oscilan entre 0 tMS/ha/año para suelos pobres con baja precipitación, hasta 13 tMS/ha/año para suelos muy ricos con alta precipitación. Para la estimación de la disponibilidad de madera para energía se consideró un contenido energético de la madera de 18 GJ/tMS. El análisis no tiene en cuenta el tiempo de corte ni clasifica las especies forestales.

APROVECHAMIENTO DE BOSQUES NATIVOS

Para estimar las existencias y la productividad potencial de combustibles de madera provenientes de bosques naturales se desarrolló una metodología espacialmente explícita basada en información de base ya existente. El rango de superficie accesible se obtuvo utilizando áreas buffer mínimas y máximas alrededor de las localidades y a cada lado de las carreteras principales, a partir de información espacial de la [Secretaría de Planificación y Programación de la Presidencia](#). Los valores de productividad volumétrica se obtuvieron de casos de estudio con condiciones de crecimiento similares a las de Guatemala. Estos valores de productividad fueron multiplicados por el peso específico de la madera para obtener la productividad gravimétrica en toneladas de materia seca por hectárea por año (tMS/año). El incremento anual de madera para energía se obtiene como el producto de la superficie accesible por la productividad (que varía de acuerdo a la aptitud del terreno). Para conversiones energéticas se utilizó un peso específico promedio de la madera de 0.5 tMS/m³ y un contenido energético promedio de 18 Gigajoules/tMS. El coeficiente de acceso máximo a los bosques es 10 km alrededor de localidades y 3 km a cada lado de carreteras principales, mientras que el acceso mínimo es 3 km alrededor de localidades y 0.5 km a cada lado de carreteras principales.

BIOMASA DE RESIDUOS AGRÍCOLAS

SUBPRODUCTOS AGRÍCOLAS, PECUARIOS Y AGROINDUSTRIALES

Aunque aún no está cuantificado el potencial de biomasa proveniente de estos sectores, se puede estimar mediante capas referenciadas que contengan información sobre la producción anual de cultivos para diferentes regiones del país. Es importante también contar con información sobre el coeficiente de residuos generados y los usos potenciales de los mismos.

CULTIVOS DEDICADOS

Se estimó el potencial de producción de etanol y biodiesel por medio de plantaciones dedicadas de caña de azúcar y de palma de aceite respectivamente. Al igual que para las plantaciones forestales energéticas, se obtuvieron superficies con diferente potencial para el establecimiento de cultivos dedicados (0=bajo, 1=alto). Las variaciones en el potencial (por ejemplo, calidad del sitio para el cultivo de caña de azúcar) se ven reflejadas en las superficies cosechadas.

Se aplicaron seis criterios de exclusión para determinar las áreas no adecuadas para cada cultivo: 1) rangos de precipitación; 2) altitud; 3) pendientes; y 4) clases de cobertura del suelo (se excluyeron los bosques, matorrales y las zonas destinadas actualmente a agricultura de alimentación).

Para determinar el equivalente energético del potencial (PJ/año) se tomaron las siguientes consideraciones; para la caña de azúcar se considera que el 50% de la producción podría derivarse a la obtención de etanol, un factor de conversión de 70 litros por tonelada y un poder calorífico del etanol de 23.4 MJ/litro, para el caso de la palma se utilizó un factor de conversión de 300 litros por tonelada y un poder calorífico del etanol de 37 MJ/litro.

RESIDUOS URBANOS

A pesar que hasta el momento no se cuenta con información oficial que permita estimar el potencial energético de residuos sólidos urbanos, el mismo puede obtenerse a través de la fracción orgánica contenida en dichos residuos. El potencial se puede estimar por medio de la siguiente ecuación:

$$Pt = Mr * Gm * PC \quad (4)$$

Dónde: Pt es el potencial energético de los residuos urbanos (PJ/año); Mr la masa de los residuos orgánicos totales (t/año); Gm es el rendimiento de biogás o generación específica de metano (m³/t); PC el poder calorífico del biogás producido estimado en 17 MJ/m³.

El rendimiento de biogás está en función del contenido de humedad de los residuos, de la disponibilidad de nutrientes y bacterias en la materia orgánica, el PH y la temperatura. Para este trabajo, el rendimiento fue considerado como el promedio de 80 m³/t establecido por [\(Ríos y Kaltschmitt, 2013\)](#).

MÓDULO DE INTEGRACIÓN

La integración entre oferta y demanda es de suma importancia para identificar zonas donde no exista competencia de recursos. Éste es un punto dinámico, donde la oferta y demanda no pueden ser evaluadas por separado. Para generar este módulo es necesario contar con una base georreferenciada de usuarios actuales de bioenergía con sus respectivos consumos.

ANÁLISIS DEL CONSUMO ACTUAL

Según datos del [Balance Energético \(2017\)](#), la generación de energía eléctrica en el país depende principalmente plantas termoeléctricas a base de carbón mineral importado. Debido a la tendencia del incremento en los costos de los combustibles fósiles en el mercado internacional, existe un enorme potencial de uso de biomasa en estas centrales eléctricas, que además apoyaría a mitigar las emisiones de GEI asociadas.

Bajo este contexto, actualmente existen numerosos casos de producción de electricidad con biomasa en Guatemala, donde la energía producida es destinada principalmente a autoconsumo. Los principales recursos biomásicos utilizados como combustibles son bagazo de caña de azúcar y diversos residuos agroindustriales. En la siguiente tabla se detalla la demanda actual de biomasa en las principales empresas generadoras del país, según información del [MEM \(2017\)](#).

Tabla 7. Demanda actual de biomasa en el sector eléctrico

Nombre empresa o proyecto	Residuo utilizado	Potencia instalada (MW)	Energía anual (MWh/año) *	Consumo de biomasa (tMS/año) *	Equivalente energético (PJ/año) *
Compañía agrícola industrial Ingenio Palo Gordo, S.A.	Bagazo de caña	2.0	42,048	10,011	0.15
Generadora del Atlántico, S.A.	Biogás	1.6	33,638	6,728	0.12
Agrogeneradora, S.A. Santa Ana	Biomasa	1.1	23,126	4,625	0.08
Compañía de Servicios y Combustión Industrial, S.A. (Chicaman)	Biomasa	1.5	31,536	7,509	0.11
Compañía de Servicios y Combustión Industrial, S.A. (Santiago Chimaltenango)	Biomasa	1	21,024	5,006	0.08
Compañía de Servicios y Combustión Industrial, S.A. (Jacaltenango)	Biomasa	4	84,096	20,023	0.30
Compañía de Servicios y Combustión Industrial, S.A. (Mujubal)	Biomasa	1	21,024	5,006	0.08
Compañía de Servicios y Combustión Industrial, S.A. (Nebaj)	Biomasa	1.5	31,536	7,509	0.11
Palma Sur, S.A. Planta extractora de aceite	Biomasa	3	63,072	15,017	0.23
TOTAL				81,433	1.26

La demanda actual de biocombustibles sólidos en el sector eléctrico supera 1 PJ/año, que representa aproximadamente el 1 % del potencial técnico máximo que proviene del sector forestal (140 PJ/año). Los datos de potencia instalada fueron obtenidos del Registro de centrales generadoras no

tradicionales menores o iguales a 5 MW (biomasa), del Ministerio de Energía y Minas de la República de Guatemala.

OFERTA POTENCIAL PARA CALOR Y ELECTRICIDAD

Actualmente, Guatemala cuenta con un enorme potencial técnico de recursos biomásicos que se podrían aprovechar con fines energéticos para ampliar la participación de la bioenergía en la matriz energética nacional, superando los 1,300 PJ/año. El mayor potencial proviene de los cultivos dedicados de caña de azúcar y palma de aceite, sin embargo, es importante aclarar que se trata de un potencial técnico, que no contempla aspectos económicos de producción y que considera aspectos básicos de sustentabilidad. El potencial estimado para la producción de etanol y biodiesel podría satisfacer todas las importaciones actuales de gasolina y diésel del país (24,000 kBEP = 68.4 PJ) según datos del Balance Energético (2017).

Las plantaciones forestales dedicadas podrían abastecer leña para cubrir la demanda total en el país (aproximadamente 182 PJ/año). La madera proveniente de bosques nativos es una importante fuente de energía, que podría ser aprovechada mediante planes sustentables de manejo forestal. El potencial de la industria de la madera, a pesar de generar la menor oferta, tiene las mejores condiciones físicas para su uso inmediato. Sería necesario explorar opciones tecno-económicas (pellets, astillas) para su uso eficiente en los diferentes sectores económicos del país.

Tabla 8. Potencial técnico total de recursos biomásicos para uso energético.

Recurso	Residuo/producto generado	Potencial energético (PJ/año)
Sector forestal		
Subproducto de extracción y de la industria de transformación	Puntas, ramas, recortes, aserrín, costaneros	0 – 9.9
Plantaciones dedicadas	Leña	0 – 326*
Bosques nativos	Leña	43 – 140
Cultivos dedicados		
Caña azúcar	Etanol	227 – 344
Palma de aceite	Biodiesel	377 – 503
TOTAL		647 – 1,323

Nota: se toma a modo conservativo el potencial energético del Eucalipto.

USO DE LEÑA Y CARBÓN VEGETAL: BIOMASA “TRADICIONAL”

A pesar del hecho de que la energía tradicional de la madera (leña y carbón vegetal) todavía se usa ampliamente en muchos países en desarrollo ([IEA, 2012](#)), el impacto de la cosecha de leña en bosques sigue siendo un punto de discusión. Identificada como la "otra crisis energética" en la década de 1970 ([Eckholm 1975](#)), la extracción de leña y la producción de carbón por parte de las poblaciones rurales y periurbanas pobres se consideraron como los principales impulsores de la degradación ambiental. Algunos análisis todavía informan una conexión directa entre los combustibles de madera y la

"deforestación severa" (por ejemplo, [Singh et al., 2010](#), [Pang et al., 2013](#)) o la degradación forestal ([Ahrends et al., 2010](#), [Ryan et al., 2012](#), [Cantarello et al. 2014](#), [Moroni y Musk 2014](#), [Orozumbekov et al. 2014](#), [Specht et al. 2015](#)). Sin embargo, otros piensan que la demanda de leña tiene un impacto limitado en la cubierta forestal (por ejemplo, [Hansfort y Mertz 2011](#), [Shrestha et al., 2013](#)) porque se ve ensombrecida por otros procesos socioeconómicos y ecológicos ([Foley 1985](#), [Hosier 1993](#), [de Waroux y Lambin 2012](#)).

Las generalizaciones son intrínsecamente engañosas, ya que los patrones espaciotemporales de oferta y demanda de leña son específicos del sitio y los impactos en la vegetación varían mucho de un lugar a otro ([Ghilardi et al., 2007](#), [Wangchuk et al., 2014](#)) y como resultado de patrones específicos de uso de recursos, p.ej leña de subsistencia o carbón comercial ([Naughton-Treves et al., 2007](#)). Además, la vegetación responde a las perturbaciones de maneras que pueden afectar las prácticas de recolección, el cambio de preferencia de especies, los sitios de extracción y los volúmenes extraídos ([Ruger et al., 2008](#), [He et al., 2009](#), [Jagger y Shively 2014](#)).

Dentro del ámbito de las políticas, se necesitan evaluaciones más matizadas y precisas que den cuenta de los efectos espaciotemporales para predecir mejor el impacto de las intervenciones, como los programas mejorados de estufas (Improved Cookstoves (ICS)) y los hornos de carbón mejorados. En el pasado, los impactos positivos se han asumido como una cuestión de fe en la tecnología en lugar de como se demuestra a través del análisis científico. Por lo tanto, existe una necesidad apremiante de modelos que evalúen con firmeza los impactos de las intervenciones así como como los flujos de carbono.

Las técnicas de modelado geoespacial son una opción prometedora para hacer explícita la variabilidad espaciotemporal ([Deaton y Winebrake 2000](#), [Costanza y Voinov 2004](#), [Paegelow y Camacho-Olmedo 2008](#), [Murayama y Thapa 2011](#)). Las preguntas centrales que deben abordarse son:

1. ¿Cuánto combustible de madera se cosecha en un lugar determinado dentro de un marco de tiempo específico?
2. ¿Cómo responde la vegetación a esta presión, medida por las existencias de biomasa aérea y las tasas de crecimiento?
3. ¿Cómo los cambios en la demanda de combustible de madera (por ejemplo, mediante la diseminación de estufas que ahorran combustible) alteran los patrones de cosecha y crecimiento con el tiempo?

Para responder a estas preguntas para el caso de leña residencial (es decir, leña), desarrollamos MoFuSS (Modeling Fuelwood Savings Scenarios - Modelado de escenarios de ahorro de leña) versión 1.0, un modelo espacialmente explícito y dinámico que simula el efecto de la cosecha de leña en la vegetación local. El objetivo general en la construcción del modelo es cuantificar las reducciones esperadas en la cosecha insostenible de biomasa leñosa resultante de intervenciones externas que reducen la demanda. Es importante señalar que MoFuSS fue diseñado para ser aplicado en áreas de estudio donde la leña es una importante fuente de energía para el sector residencial, en el que opera la recolección de madera para uso propio y mercados localizados, y no para paisajes carbonizados en los que los patrones y los mercados comerciales difieren significativamente ([Masera et al., 2015](#)).

MoFuSS proyecta los sitios de cosecha de leña a tiempo según el acceso de las fuentes de leña. La vegetación responde a la cosecha en cada iteración en función de la cantidad de madera extraída y las funciones de crecimiento para los árboles dentro y fuera de los bosques. Un módulo de Monte Carlo tiene en cuenta las incertidumbres inherentes asociadas con los parámetros de entrada. El modelo

también da cuenta de las tendencias observadas y esperadas en la pérdida y ganancia forestal que no están relacionadas con la cosecha de leña. Esto permite que parte de la demanda de leña se satisfaga de los subproductos de las actividades de limpieza de tierras, como la expansión agrícola, y para ajustar el mapa de suministro de leña en cada paso del tiempo.

INTRODUCCIÓN A MOFUSS

MoFuSS se creó en un entorno de modelado freeware denominado "DINAMICA EGO" (EGO, siglas de Environment for Geoprocessing Objects), diseñado para construir modelos complejos para el análisis y la simulación de fenómenos espaciales y temporalmente dinámicos ([Soares-Filho et al., 2010](#)). Mediante el uso del lenguaje de flujo de datos (arrastrando y conectando algoritmos a través de sus puertos), los modelos se construyen y se muestran como diagramas, que son relativamente fáciles de comprender y modificar por usuarios que no están familiarizados con los lenguajes y scripts de la computadora. El software se ha popularizado entre los usuarios que analizan una amplia gama de fenómenos dinámicos (por ejemplo, [Soares et al., 2006](#), [Nepstad et al., 2009](#), [Soares et al., 2010](#), [Bowman et al., 2012](#), [Carlson et al., 2012](#), [Pérez-Vega et al. al. 2012](#), [Soares et al. 2012](#), [Ferraz 2013](#), [Kolb et al. 2013](#), [Pathiranaa et al. 2013](#), [Brando et al. 2014](#), [Sonter et al. 2014a](#), [Sonter et al., 2014b](#)). Además, los scripts DINAMICA EGO en MoFuSS activan varios procesos externos que se ejecutan en R (www.r-project.org), FFmpeg (www.ffmpeg.org) y LaTeX (miktex.org) que proyectan, remuestran, rasterizan y recortan datos de entrada, realice análisis estadísticos, genere gráficos, mapas animados y un informe resumido final en pdf.

MoFuSS simula la dinámica espaciotemporal en un paisaje sujeto a la extracción tradicional de leña. Describe los cambios en un patrón espacial desde el momento t hasta el tiempo $t + 1$, de modo que:

$$X_{(t+1)} = f(X_{(t)}, Y_{(t)}) \quad (5)$$

Donde $X(t)$ es el patrón espacial en el tiempo " t " e $Y(t)$ es un conjunto de elementos de datos que pueden representar la transición, como mapas, tablas, matrices, expresiones matemáticas / lógicas o constantes. MoFuSS tiene tres funciones principales:

1. Proyectar la presión ejercida por la cosecha de leña sobre las fuentes existentes de biomasa leñosa.
2. Estimar la respuesta esperada de la vegetación a la perturbación en términos de crecimiento de AGB.
3. Estimar el efecto de las intervenciones que reducen el consumo de leña en el stock y crecimiento forestal existente.

MoFuSS consta de cuatro componentes o módulos: 1) un componente de fricción que crea mapas de impedancia; 2) un algoritmo modificado de distancia inversa ponderada (IDW) que crea mapas de presión que representan la propensión de los eventos de cosecha de leña; 3) un componente de oferta / demanda que proyecta la cantidad esperada de leña que se cosechará en cada marco de tiempo en cada píxel, y la respuesta de la vegetación a esa perturbación; y 4) un módulo de pérdida y ganancia forestal que proyecta eventos de limpieza de tierras o eventos de ganancia forestal en cada paso de tiempo, con base en observaciones anteriores.

MoFuSS integra un conjunto de scripts que requiere algún freeware para ser instalado primero. El primer paso consiste en descargar el manual de usuario de MoFuSS en este enlace:

<https://gitlab.com/MoFuSS/MoFuSS>. Esta sección contiene instrucciones detalladas pero concisas para descargar, instalar y usar MoFuSS y cualquier otro programa gratuito necesario. MoFuSS (versión 1.0) fue diseñado y codificado por Adrian Ghilardi entre septiembre de 2011 y abril de 2015 con contribuciones de cuatro coautores: Jean-François Mas, Robert Bailis, Rudi Drigo y Omar Masera. Un quinto coautor, Ernesto Vega, ayudó con problemas de código R durante la depuración.

MoFuSS y cualquier otro software necesario están disponibles para su descarga y uso, y todos los scripts de MoFuSS se pueden abrir, editar y guardar con cualquier editor de código libre como Notepad ++ o Sublime Text. Los guiones de MoFuSS fueron codificados en Dinamica EGO (.egoml), R (.R), LaTeX (.tex) y Windows batch scripting (.bat). Los scripts de MoFuSS y los archivos asociados (por ejemplo, ffmpeg.exe, zip.exe, mensajes pdf) son aproximadamente 45 MB, y el conjunto de datos de Guatemala (datos de trama espacial en geotiff, datos vectoriales espaciales y tablas) es de aproximadamente 550 MB y se puede descargar como un archivo separado, como se explica en el manual del usuario.

MODULO DE DEMANDA

La magnitud y distribución espacial de la demanda de leña se calcula siguiendo la ecuación 6:

$$C_{(t)} = \left(\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n hh_{ij} \cdot u_j \cdot f c_i \right)_{(t)} + \left(\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n hh_{ij} \cdot u_j \cdot f b_i \right)_{(t)} \quad (6)$$

donde C (t) es el consumo total de leña residencial en tDM para cualquier paso de tiempo "t"; hhij es el número de hogares que usan leña, por la comunidad "i" que usa un dispositivo de cocción "j" (una estufa tradicional o incluso mejorada pero considerada como el escenario de negocios normales); uj es el consumo de los hogares en tDM; fci es la fracción promedio de leña que se recolecta; y fbi es la fracción promedio de leña que se compra.

La distribución espacial de los sitios de recolección de leña está determinada en parte por su proximidad a los centros de demanda. Los mapas de fricción o impedancia son un medio de procesamiento geográfico para dar cuenta de la "proximidad" de una manera realista (Salonen et al., 2012). En estos mapas, cada píxel o celda se puede caracterizar por el tiempo que un colector de leña necesita para viajar a pie o en vehículo (según las vías utilizadas en una localidad determinada). Los datos requeridos para construir mapas de fricción son las velocidades de desplazamiento de los colectores de leña y las características topográficas (pendientes, condiciones del camino, ríos y cuerpos de agua), o tipos de cobertura terrestre (por ejemplo, la vegetación densa o espinosa reduce las velocidades de desplazamiento).

Un componente de IDW crea un mapa de presión (es decir, representa la probabilidad o propensión de cada píxel para cosechar leña) para dos tipos de colectores de leña: 1) personas que viajan a pie y recolectan leña para uso doméstico, y 2) vendedores comerciales de madera que usan vehículos, lo que les permite acceder a áreas distantes y transportar grandes volúmenes de madera. La ecuación 3 define cómo se calculan los mapas de presión:

$$P_{(t)k} = \left(\sum_{i=1}^n \frac{C_{ik}}{d_{ik}^n} \right)_{(t)} \quad (7)$$

Donde P (t) k es un índice que indica la presión de ambos tipos de colectores de leña "k" para cualquier paso de tiempo "t"; C es el consumo residencial de leña en tDM por localidad, aldea o ciudad "i"; d es el

tiempo acumulado (costo-distancia) necesario para llegar a cualquier píxel de cada localidad o aldea; y n es un número real positivo que modula la función de disminución de la interpolación.

El índice resultante es una interpolación Weighted Distance modificada, en la que la distancia (en unidades lineales) se reemplaza por el costo acumulado (en unidades de tiempo). El poder de esta simple ecuación reside en el hecho de que cada píxel dentro del área de análisis está influenciado por todos los centros de consumo. Esto evita la necesidad de determinar las áreas accesibles para leña o las denominadas "cobertizos para leña" ([Ghilardi et al. 2009](#)) o áreas "alcanzables" (The Gold Standard 2011), que no tienen en cuenta los centros de demanda superpuestos y son difíciles de definir. El hecho de que las personas tienen más probabilidades de recolectar combustible cerca de su lugar de residencia se integra en el modelo en forma de costos de viaje. Si se conocen algunas frecuencias y ubicaciones de recolección (a partir de mediciones de GPS terrestres, por ejemplo), la función de disminución se puede calibrar para reflejar los patrones de recolección observados. Este cálculo ha sido informado previamente por varios autores ([Ghilardi y Mas 2011](#), [Chen et al. 2014](#), [Bailis et al. 2015](#)).

Los mapas de presión se cargan en un módulo gobernado por un mecanismo estocástico. Finalmente, el consumo total de madera recolectada y comprada en el área de estudio se distribuye sobre los mapas resultantes del mecanismo de siembra estocástica.

MÓDULO DE OFERTA

Hay tres fuentes principales de leña residencial:

1. Bosques y selvas: la leña se suministra podando o cortando árboles vivos o recogiendo ramas caídas y madera muerta.
2. Árboles fuera de los bosques (TOF): incluye árboles en tierras de cultivo, compuestos domésticos y áreas comunes a los lados de las carreteras, a los que se accede podando árboles vivos y / o recolectando ramas muertas / derribadas. Esta categoría también incluye los árboles de sombra en las plantaciones de café, que se podan regularmente y constituyen una importante fuente de madera en las zonas cafeteras de la región.
3. Actividades de limpieza de tierras: incluye la tala de bosques o matorrales para nuevos cultivos o pastoreo y constituye una importante fuente de suministro de madera.

Se supone que el crecimiento de la biomasa leñosa es una función de tres factores: el stock en la iteración anterior, la tasa máxima de crecimiento (r_{max} : la primera derivada de la curva "tipo S") y la densidad máxima de biomasa o "capacidad de carga" (K) ([Bailis et al. 2015](#)). Tanto r_{max} como K dependen de parámetros biofísicos como la cobertura de la tierra, el suelo, la hidrología, la insolación y la altitud, entre otros. Sin embargo, los datos para múltiples parámetros de crecimiento biofísico raramente están disponibles. En nuestro estudio de caso, por ejemplo, definimos K y r_{max} basados únicamente en la clase LULC. La ecuación 4 describe esta relación:

$$AGB_{(t+1)i} = AGB_{(t)i} + AGB_{(t)i} \cdot r_{max} \cdot \left(1 - \frac{AGB_{(t)i}}{K_i}\right) \quad (8)$$

$AGB(t)$ i y $AGB(t+1)$ i son biomasa leñosa sobre el suelo adecuada para leña en la clase LULC "i". El stock de biomasa inicial, $AGB(t=0)$, determinará el comportamiento futuro de AGB durante el período de simulación. MoFuSS acepta mapas LULC con tantas clases como estén disponibles, pero también se requieren parámetros de stock y crecimiento para cada clase. Los mapas que muestran una distribución

espacial continua de AGB ($t = 0$) (por ejemplo, [Cartus et al., 2014](#)) son igualmente válidos (incluso deseables) porque la ecuación 4 se calcula píxel por píxel.

Además, si AGB cae por debajo de un umbral ajustable, los píxeles se vuelven "no controlables" hasta que el crecimiento natural los eleva por encima del umbral. En este conjunto de simulaciones, el umbral se estableció en 5.0 tDMha⁻¹ para personas que usan vehículos y 0.1 tDMha⁻¹ para personas que cosechan a pie. Vale la pena señalar que estos valores son "cálculos aproximados" sin literatura o respaldo de datos de campo. Pero dado que solo se aplican a bosques y bosques, se espera que la gente recurra a áreas vecinas donde AGB está por encima de estos valores.

MoFuSS incluye una simulación de Monte Carlo (MC) para adaptarse a la incertidumbre inherente de los patrones de crecimiento de la biomasa leñosa y la acumulación de existencias de AGB. Con cada corrida de CM, todos los parámetros de crecimiento de biomasa leñosa varían aleatoriamente siguiendo las funciones de densidad de probabilidad normal truncada (Figura A.6 en el Material suplementario en línea). El número predeterminado de ejecuciones se estableció en 100.

Otros parámetros que pasan por el módulo MC pero no están relacionados con el crecimiento de biomasa son la parte del paisaje "visitada al menos una vez" para la recolección de leña en cada iteración y un factor de transición que regula el grado de estocasticidad del mecanismo de siembra.

La sensibilidad de los resultados a algunos parámetros de entrada fue probada ejecutando 6 simulaciones de 100 realizaciones de Monte Carlo cada una, mientras que permite que un parámetro por simulación varíe aleatoriamente y mantenga los otros constantes. Los parámetros analizados fueron: porcentaje de paisaje cosechado en cada iteración, factor de ciruela pasa, biomasa máxima alcanzable K , tasa de crecimiento r_{max} y leña disponible de árboles fuera de los bosques.

MÓDULO DE OFERTA VS DEMANDA: SIMULACIÓN DINÁMICA DE EVENTOS DE COSECHA Y REVEGETACIÓN DEL PAISAJE POR CRECIMIENTO NATURAL

Según se define en la lista de siglas, la biomasa no renovable (NRB) es la cantidad de madera cosechada que excede el crecimiento natural durante un período de tiempo determinado, más comúnmente un año. Cuando el NRB se da como una fracción del uso total de leña, en su lugar se usa el fNRB ("fracción de biomasa no renovable"). Esto describe la proporción de la cosecha de leña que es insostenible.

En el modelo, cada paso de tiempo es una iteración (un año en nuestro caso de estudio) y n -pasos constituye una simulación. MoFuSS se ejecuta durante cualquier período de simulación especificado por el número de ejecuciones de Monte Carlo que se establecen, produciendo tres parámetros de salida principales: a) el stock AGB restante (crecimiento menos cosecha en $t = n$), b) NRB calculado en píxeles donde disminuye en AGB han ocurrido (ecuación 5), y c) fNRB, calculada como la fracción del consumo total de leña que no es renovable (ecuación 6). Estos dos productos básicos se modelan: 1) dentro de cada iteración (imitando un análisis de oferta-demanda estático); 2) dentro de cada período de simulación; y 3) para todo el conjunto de realizaciones de Monte Carlo para NRB y fNRB. Para cada píxel:

$$NRB_{(t=n)} = \begin{cases} AGB_{(t=0)} - AGB_{(t=n)} & \text{if } AGB_{(t=0)} > AGB_{(t=n)} \\ 0 & \text{if } AGB_{(t=0)} \leq AGB_{(t=n)} \end{cases} \quad (9)$$

Donde $NRB(t = n)$ es la cantidad de leña en tDM que, cuando se cosecha, da como resultado una disminución neta en AGB entre el tiempo $t = 0$ y $t = n$. En esta evaluación, n puede consistir en una o varias iteraciones de un solo paso: una iteración corresponde al análisis estático de oferta-demanda descrito anteriormente como output1; $n = 30$ corresponde a la simulación completa descrita anteriormente como salida 2. Cada ejecución MC genera un valor diferente de $NRB(t = n)$ repitiendo la ecuación 5 en cada ejecución (salida 3). $NRB(t = n)$ se calcula a nivel de píxel, lo que significa que no tiene en cuenta ningún incremento de AGB que se produzca en áreas donde $AGB(t = n) \geq AGB(t = 0)$. En otras palabras, $NRB(t = n)$ no es la disminución neta de AGB en todo el "cobertizo de leña". En cambio, da cuenta de las pérdidas de AGB solo en el conjunto de píxeles donde se produjo una pérdida.

Finalmente, la fracción de NRB con respecto a la madera cosechada se calcula como:

$$fNRB_{(t=n)} = \frac{NRB_{(t=n)}}{C_{(t=n)}} \quad (10)$$

Como se mencionó anteriormente, MoFuSS se ejecuta durante muchas iteraciones de paso de tiempo dentro de una simulación. $C(t)$ puede expresarse como $C(n)$, que corresponde al consumo de leña sumado entre el tiempo 0 y el tiempo n (ecuación 6). Como $C(t)$ se carga en cada iteración de un solo paso, los cambios temporales (y espaciales) en el uso de leña, que pueden ser inducidos por una difusión gradual y espacialmente desigual de ICS, pueden simularse en MoFuSS. Sin embargo, si falta información espaciotemporal sobre el despliegue pasado y esperado de ICS, MoFuSS puede simular la difusión hipotética de ICS que se distribuye uniformemente en el espacio, es decir, proporcional a las tendencias de uso de leña en el escenario de BaU.

Ejecutamos MoFuSS de 2000 a 2030 bajo dos escenarios: BaU, suponiendo valores promedio de uso de leña asociado con cocinas tradicionales, y un escenario de proyecto, suponiendo una difusión gradual y espacialmente uniforme de ICS entre 2000 y 2030. Bajo este escenario se asumió que se logró una disminución anual del 5% en el uso de leña mediante un proyecto de intervención "exitoso".

DIRECCIONES FUTURAS DE TRABAJO

El modelo propuesto, MoFuSS, se incorporan nuevas características en comparación con los modelos anteriores ([Top et al. 2006](#), [Ghilardi 2009](#), [Bailis et al., 2015](#)) y representa las situaciones de la vida real más de cerca en el nivel de paisaje con respecto a la cosecha tradicional de leña para fines residenciales. Sin embargo, se necesitan más mejoras para integrar otros patrones y procesos comunes asociados con el suministro y la demanda de leña. Las mejoras más relevantes que se desarrollarán en el futuro serían:

1. Verificar resultados con datos empíricos basados en el campo es una tarea altamente desafiante pero necesaria. Una forma de avanzar es utilizar técnicas de teledetección para cuantificar la degradación forestal (por ejemplo, [Ryan et al., 2012](#)) en áreas y períodos de tiempo previstos por el modelo (por ejemplo, 2000 a 2015), en lugares donde la degradación causada por la extracción de leña debería ser significativa. La tarea tiene que hacer frente a múltiples complejidades, como separar los controladores superpuestos para probar la causalidad en cualquier cambio observado. Información adicional sobre la validación de los resultados se proporciona en el Apéndice B-3 en el Material complementario en línea.
2. Agregar una función elástica para la demanda basada en la escasez: a medida que disminuyan las fuentes y suministros de leña, impulsados por la sobreexplotación o más comúnmente por procesos LULC, el consumo unitario también debería disminuir y la propensión a cambiar a los

portadores de energía alternativa tales como ya que el GLP debería subir. Estas suposiciones están fuertemente influenciadas por diversos parámetros espaciales (por ejemplo, proximidad a la red de distribución de GLP) y no espaciales (por ejemplo, datos socioeconómicos) ([Khuman et al., 2011](#)). Estamos modificando ecuaciones del tipo "depredador-presa" para lograr esto.

3. Además del uso de leña para fines residenciales, incluya otros usos como carbón o leña para pequeñas industrias.
4. Incluir un módulo que busque patrones hipotéticos de difusión de estufas que maximicen el ahorro de carbono en comparación con los patrones de diseminación alternativos. El módulo de "mejor solución" podría basarse en un algoritmo genético que maximice la llamada función de optimización dado un conjunto de variables de penalización que representan las limitaciones logísticas de cualquier proyecto de estufas en particular.
5. Las alternativas a los procedimientos de sensibilidad de "un factor a la vez", que asumen que los parámetros son independientes entre sí, han sido propuestos en la literatura (Saltelli y Annoni 2010) y deben ser explorados para el presente modelo de enfoque.
6. Otras mejoras importantes para las versiones de gama alta del modelo incluyen:
7. Un componente "climático" que integra los factores de emisión de las estufas tradicionales y los ICS y, en consecuencia, traduce NRB en gases de efecto invernadero o valores CO₂eq para BaU y escenarios de proyectos.
8. Las nuevas versiones del componente de crecimiento de la biomasa leñosa incluirán sucesiones que conducen a diferentes mosaicos paisajísticos, biodiversidad, competencia entre especies o respuestas a la tala selectiva (por ejemplo, [Ruger et al., 2008](#), [Medvigy et al., 2009](#), [Medvigy et al., 2010](#), [Medvigy y Moorcroft 2012](#)).
9. Un desarrollo a más largo plazo consiste en agrupar versiones mejoradas de MoFuSS con otros modelos de pastoreo basados en DINAMICA (por ejemplo, [Bowman et al., 2012](#)) e incendios (por ejemplo, [Soares et al., 2012](#)), para integrar otros factores de degradación forestal. Un ejemplo notable de esto, y con el alcance más amplio para comprender el ciclo biogeoquímico, es el trabajo de [Liu y colaboradores \(2004\)](#). En este estudio, la cosecha de leña y las actividades en barbecho se integran con los escenarios de LULCC y cambio climático para explorar los impactos a largo plazo en la dinámica del carbono. Aunque los patrones de cosecha de leña se modelan de una manera diferente a la del presente estudio, se puede tomar como referencia sólida en términos de técnicas y enfoque para integrar varios impulsores del cambio de ecosistemas en un conjunto de modelos.

En conclusión, hemos desarrollado un modelo que explora los impactos de procesos complejos como la cosecha de leña en el medio ambiente. El modelo se puede usar en una variedad de aplicaciones que incluyen cuantificar la dinámica del carbono en los sistemas tradicionales de leña, aumentar nuestra comprensión de los procesos que afectan la seguridad energética de las personas pobres dependientes del bosque y examinar diversas estrategias para garantizar la sostenibilidad a largo plazo de la biomasa leñosa recursos.

ANÁLISIS PROSPECTIVO (ESCENARIO PESIMISTA, TENDENCIAL Y OPTIMISTA) HACIA 2030

CONCLUSIONES GENERALES DEL ESTUDIO DE CASO

El potencial mínimo de biomasa obtenido (647 PJ/año) podría cubrir más del 100% del consumo total de energía en Guatemala (49,000 kBEP = 279 PJ). El potencial energético que proviene como subproducto de la industria forestal y de los bosques nativos (53 - 150 PJ/año), podría ser utilizado para reemplazar el todo el carbón mineral (7,500 k BEP = 48.5 PJ) por medio de co-combustión en el sector eléctrico. El potencial resultante del aprovechamiento y de la industria forestal es muy interesante dado que es un recurso existente. Su uso inmediato depende principalmente de la disponibilidad tecnológica para la transformación en distintos vectores energéticos y para su uso eficiente; de la infraestructura de caminos y de los sistemas de transporte; y de las condiciones económicas, principalmente de la competitividad con los precios actuales de los combustibles fósiles en el país.

A pesar que el potencial de plantaciones forestales dedicadas es mayor que el de bosques nativos, variando de 153 a 326 PJ/año para el caso de la Acacia y el Eucalipto respectivamente, se trata de un potencial teórico, que puede o no desarrollarse, a diferencia del potencial energético estimado para el sector forestal. Sin embargo, estos valores permiten estimar las áreas más prominentes para establecer plantaciones para la producción de leña, y que además permitirían brindar diferentes servicios ecosistémicos.

Se podrían producir más de 9,000 millones de litros de bioetanol (227 PJ/año) a partir del cultivo de caña de azúcar. Esta cantidad permitiría aumentar el nivel de las exportaciones, o bien, asegurar el suministro nacional para cumplir con la Ley 17-85, que establece la mezcla de gasolinas con bioetanol en 5%. El cultivo de palma de aceite permitiría producir cerca de 10,000 millones de litros de biodiesel al año (377 PJ/año), como alternativa al cultivo de *Jatropha curcas*, atendiendo la volatilidad de los precios internacionales del biocombustible. Es importante mencionar que los cultivos energéticos mencionados, y los que se propongan en el futuro, deben estar impulsados por medio de políticas ambientales que aseguren la sustentabilidad a lo largo de sus ciclos de vida. Se debe evitar principalmente la competencia de tierras con cultivos alimenticios y el cambio de uso de suelo desmedido.

Para mejorar la estimación del potencial energético de los recursos evaluados, es necesario en primer lugar, afinar la estimación del potencial de las plantaciones forestales y de cultivos dedicado. Es indispensable contar con el mapa de suelos para vincular las calidades de suelos en las diferentes regiones del territorio nacional con las aptitudes de crecimiento de los cultivos mencionados. Se deben afinar los criterios de sustentabilidad para el aprovechamiento y uso de cada recurso, de acuerdo a cada región específica. Por último, se deben considerar los costos de logística y de producción, además de los precios comparativos de los combustibles fósiles en el mercado nacional, a fin de determinar los potenciales sustentables y económicos respectivamente, y de encontrar alternativas de uso para los diferentes recursos analizados.

BIBLIOGRAFÍA

ACR, Asociación de Combustibles Renovables de Guatemala (2014). Biocombustibles y Oportunidades para Guatemala. <http://www.mem.gob.gt/wp-content/uploads/2014/02/03-ACR-Aida-Lorenzo.pdf>

Ahrends, A., Burgess, N.D., Milledge, S.A.H., Bulling, M.T., Fisher, B., Smart, J.C.R., Clarke, G.P., Mhoro, B.E., Lewis, S.L., 2010. Predictable waves of sequential forest degradation and biodiversity loss spreading from an African city. *Proc. Natl. Acad. Sci. U. S. A.* 107 (33), 14556-14561.

Bailis, R., Drigo, R., Ghilardi, A., Masera, O., 2015. The carbon footprint of traditional woodfuels. *Nat. Clim. Change* 5, 266e272.

Balance Energético (2017). Ministerio de Energía y Minas, Dirección General de Energía. República de Guatemala.

Bowman, M.S., Soares, B.S., Merry, F.D., Nepstad, D.C., Rodrigues, H., Almeida, O.T., 2012. Persistence of cattle ranching in the Brazilian Amazon: a spatial analysis of the rationale for beef production. *Land Use Policy* 29 (3), 558e568.

Brando, P.M., Balch, J.K., Nepstad, D., Morton, D.C., Putz, F.E., Coe, M.T., Silverio, D., Macedo, M.N., Davidson, E., Nobrega, C.C., Alencar, A., Soares-Filho, B.S., 2014. Abrupt increases in Amazonian tree mortality due to drought-fire interactions. *Proc. Natl. Acad. Sci. U. S. A.* 111, 6347e6352.

Cantarello, E., Lovegrove, A., Orozumbekov, A., Birch, J., Brouwers, N., Newton, A.C., 2014. Human impacts on forest biodiversity in protected Walnut-Fruit Forests in Kyrgyzstan. *J. Sustain. For.* 33 (5), 454-481.

Carlson, K.M., Curran, L.M., Ratnasari, D., Pittman, A.M., Soares-Filho, B.S., Asner, G.P., Trigg, S.N., Gaveau, D.A., Lawrence, D., Rodrigues, H.O., 2012.

Cartus, O., Kelldorfer, J., Walker, W., Franco, C., Bishop, J., Santos, L., Fuentes, J.M.M., 2014. A national, detailed map of forest aboveground carbon stocks in Mexico. *Remote Sens.* 6 (6), 5559e5588.

Costanza, R., Voinov, A., 2004. *Landscape Simulation Modeling: a Spatially Explicit, Dynamic Approach*. Springer, New York.

CEPAL, Comisión Económica para América Latina y el Caribe (2018). Informe nacional de monitoreo de la eficiencia energética de Guatemala. Publicación de las Naciones Unidas LC/TS.2018/49. Ciudad de México.

Chen, X., Vin~a, A., Shortridge, A., An, L., Liu, J., 2014. Assessing the effectiveness of payments for ecosystem services: an agent- based modeling approach. *Ecol. Soc.* 19 (1).

Deaton, M.L., Winebrake, J.J., 2000. *Dynamic Modeling of Environmental Systems*. Springer, New York.

de Waroux, Y.L., Lambin, E.F., 2012. Monitoring degradation in arid and semi-arid forests and woodlands: the case of the argan woodlands (Morocco). *Appl. Geogr.* 32 (2), 777-786.

Eckholm, E.P., 1975. *The Other Energy Crisis, Firewood*. Worldwatch Institute, Washington.

Ferraz, Y.A., 2013. Urban expansion and environmental risk in the São Paulo metropolitan area. *Clim. Res.* 57, 73e80.

FGV, Fundação Getúlio Vargas (2018). Estudios de Viabilidad de Producción de Biocombustibles en Guatemala. Producto II – Informe de Preambulo de Viabilidad (Módulo I). Banco Interamericano de Desarrollo (BID). Río de Janeiro, Brasil.

Foley, G., 1985. Woodfuel, deforestation and tree growing in the developing world. *Energy Policy* 13 (2), 190-192.

Ghilardi, A., Guerrero, G., Masera, O., 2007. Spatial analysis of residential fuelwood supply and demand patterns in Mexico using the WISDOM approach. *Biomass Bioenergy* 31 (7), 475-491.

Ghilardi, A., Guerrero, G., Masera, O., 2009. A GIS-based methodology for highlighting fuelwood supply/demand imbalances at the local level: a case study for Central Mexico. *Biomass Bioenergy* 33 (6e7), 957e972.

Ghilardi, A., Mas, J.-F., 2011. Spatial modeling of fuelwood extraction dynamics: a case study for Honduras. In: *Memorias de la XIX Reunion Nacional de la Sociedad de Especialistas Latinoamericanos en Percepcion Remota y Sistemas de Informacion Espaciales (SELPER)*. SELPER, Morelia, Mexico.

Hansfort, S.L., Mertz, O., 2011. Challenging the woodfuel crisis in West African woodlands. *Hum. Ecol.* 39 (5), 583-595.

He, G.M., Chen, X.D., Bearer, S., Colunga, M., Mertig, A., An, L., Zhou, S.Q., Linderman, M., Ouyang, Z.Y., Gage, S., Li, S.X., Liu, J.G., 2009. Spatial and temporal patterns of fuelwood collection in Wolong Nature Reserve: implications for panda conservation. *Landsc. Urban Plan.* 93 (1), 92e92.

Hosier, R.H., 1993. Charcoal production and environmental degradation – environmental history, selective harvesting, and postharvest management. *Energy Policy* 21 (5), 491-509.

INAB, Instituto Nacional de Bosques (2017). Situación de los recursos biomásicos y del consumo de leña en Guatemala.

International Energy Agency - IEA (2012). Technology Roadmap Bioenergy for Heat and Power. Technology Roadmaps. Paris, France.

Jagger, P., Shively, G., 2014. Land use change, fuel use and respiratory health in Uganda. *Energy Policy* 67, 713-726.

Kolb, M., Mas, J., Galicia, L., 2013. Evaluating drivers of land-use change and transition potential models in a complex landscape in Southern Mexico. *Int. J. Geogr. Inf. Sci.* 27, 1804e1827.

Khuman, Y.S.C., Pandey, R., Rao, K.S., 2011. Fuelwood consumption patterns in Fakot watershed, Garhwal Himalaya, Uttarakhand. *Energy* 36 (8), 4769e4776.

LC/MEX/L (2017). Informe de la reunión de expertos sobre la situación de la biomasa en países de Centroamérica y el Caribe y evaluación del potencial para su aprovechamiento energético. CEPAL. Sede Subregional en México.

- Liu, S., Kaire, M., Wood, E., Diallo, O., Tieszen, L.L., 2004. Impacts of land use and climate change on carbon dynamics in south-central Senegal. *J. Arid Environ.* 59, 583-604.
- Masera, O., Drigo, R., Bailis, R., Ghilardi, A., Ruiz-Mercado, I., 2015. Environmental burden of traditional bioenergy use. *Annu. Rev. Environ. Resour.* 40, 121-150.
- Medvigy, D., Moorcroft, P.R., 2012. Predicting ecosystem dynamics at regional scales: an evaluation of a terrestrial biosphere model for the forests of northeastern North America. *Philos. Trans. R. Soc. B Biol. Sci.* 367 (1586), 222-235.
- Medvigy, D., Wofsy, S.C., Munger, J.W., Hollinger, D.Y., Moorcroft, P.R., 2009. Mechanistic scaling of ecosystem function and dynamics in space and time: ecosystem Demography model version 2. *J. Geophys. Res. Biogeosci.* 114 (1).
- Medvigy, D., Wofsy, S.C., Munger, J.W., Moorcroft, P.R., 2010. Responses of terrestrial ecosystems and carbon budgets to current and future environmental variability. *Proc. Natl. Acad. Sci. U. S. A.* 107 (18), 8275-8280.
- MEM, Ministerio de Energía y Minas (2017). Registro de centrales generadoras no tradicionales menores o iguales a 5 MW vigentes (biomasa). Dirección general de Energía, Departamento de Desarrollo Energético.
- Moroni, M.T., Musk, R.A., 2014. Domestic Timber Harvesting Affects Wood Quantities in Tasmanian Dry Eucalypt Forests. *Australian Forestry.*
- Murayama, Y., Thapa, R.B., 2011. Spatial Analysis and Modeling in Geographical Transformation Process: GIS-based Applications. Springer, New York.
- Naughton-Treves, L., Kammen, D.M., Chapman, C., 2007. Burning biodiversity: woody biomass use by commercial and subsistence groups in western Uganda's forests. *Biol. Conserv.* 134 (2), 232-241.
- Nepstad, D., Soares, B.S., Merry, F., Lima, A., Moutinho, P., Carter, J., Bowman, M., Cattaneo, A., Rodrigues, H., Schwartzman, S., McGrath, D.G., Stickler, C.M., Lubowski, R., Piris-Cabezas, P., Rivero, S., Alencar, A., Almeida, O., Stella, O., 2009. The end of deforestation in the Brazilian Amazon. *Science* 326 (5958), 1350-1351.
- Orozumbekov, A., Cantarello, E., Newton, A.C., 2015. Status, distribution and use of threatened tree species in the walnut-fruit forests of Kyrgyzstan. *For. Trees Livelihoods* 24 (1).
- Paegelow, M., Camacho-Olmedo, M.T., 2008. Modelling Environmental Dynamics: Advances in Geomatic Solutions, first ed. Springer, New York.
- Pathiranaa, A., Denekew, H.B., Veerbeek, W., Zevenbergen, C., Banda, A.T., 2013. Impact of urban growth-driven land use change on microclimate and extreme precipitation: a sensitivity study. *Atmos. Res.* 138, 59-72.
- Pang, C., Yu, H., He, J., Xu, J., 2013. Deforestation and changes in landscape patterns from 1979 to 2006 in Suan County, DPR Korea. *Forests* 4 (4), 968-983.

Perez-Vega, A., Mas, J.F., Ligmann-Zielinska, A., 2012. Comparing two approaches to land use/cover change modeling and their implications for the assessment of biodiversity loss in a deciduous tropical forest. *Environ. Model. Softw.* 29 (1), 11e23.

REN 21 (2016) Renewables 2016 Global Status Report. (Paris: REN21 Secretariat).

REN 21 (2017) Renewables 2017 Global Status Report. (Paris: REN21 Secretariat).

Rios M, Kaltschmitt M. Bioenergy potential in Mexico, status and perspectives on a high spatial distribution. *Biomass- Convers Biorefinery* 2013; 3:239–54.

Ruger, N., Williams-Linera, G., Kissling, W.D., Huth, A., 2008. Long-term impacts of fuelwood extraction on a tropical montane cloud forest. *Ecosystems* 11 (6), 868-881.

Ryan, C.M., Hill, T., Woollen, E., Ghee, C., Mitchard, E., Cassells, G., Grace, J., Woodhouse, I.H., Williams, M., 2012. Quantifying small-scale deforestation and forest degradation in African woodlands using radar imagery. *Glob. Change Biol.* 18 (1), 243-257.

Shrestha, S., Karky, B.S., Gurung, A., Bista, R., Vetaas, O.R., 2013. Assessment of carbon balance in community forests in Dolakha, Nepal. *Small-scale For.* 12 (4), 507-517.

Singh, G., Rawat, G.S., Verma, D., 2010. Comparative study of fuelwood consumption by villagers and seasonal "Dhaba owners" in the tourist affected regions of Garhwal Himalaya, India. *Energy Policy* 38 (4), 1895-1899

Specht, M.J., Ribeiro Pinto, S.R., Albuquerque, U.P., Tabarelli, M., Melo, Felipe P.L., 2015. Burning biodiversity: fuelwood harvesting causes forest degradation in human-dominated tropical landscapes. *Glob. Ecol. Conserv.* 3, 200-209.

Sonter, L.J., Barrett, D.J., Soares-Filho, B.S., Moran, C.J., 2014a. Global demand for steel drives extensive land-use change in Brazil's Iron Quadrangle. *Glob. Environ. Change* 26, 63e72.

Sonter, L.J., J, B.D, Soares-Filho, B.S., 2014b. Offsetting the impacts of mining to achieve no net loss of native vegetation. *Conserv. Biol.* 28 (4), 1068e1076.

Soares-Filho, B.S., Rodrigues, H., Costa, W., 2010. Modeling Environmental Dynamics with Dinamica EGO. Centro de Sensoriamento Remoto - Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, Brazil. www.csr.ufmg.br/dinamica (Last access: May 2012).

Soares, B., Moutinho, P., Nepstad, D., Anderson, A., Rodrigues, H., Garcia, R., Dietzsch, L., Merry, F., Bowman, M., Hissa, L., Silvestrini, R., Maretti, C., 2010. Role of Brazilian Amazon protected areas in climate change mitigation. *Proc. Natl. Acad. Sci. U. S. A.* 107 (24), 10821e10826.

Soares, B., Silvestrini, R., Nepstad, D., Brando, P., Rodrigues, H., Alencar, A., Coe, M., Locks, C., Lima, L., Hissa, L., Stickler, C., 2012. Forest fragmentation, climate change and understory fire regimes on the Amazonian landscapes of the Xingu headwaters. *Landsc. Ecol.* 27 (4), 585e598.

Soares, B.S., Nepstad, D.C., Curran, L.M., Cerqueira, G.C., Garcia, R.A., Ramos, C.A., Voll, E., McDonald, A., Lefebvre, P., Schlesinger, P., 2006. Modelling conservation in the Amazon basin. *Nature* 440 (7083), 520e523.

Top, N., Mizoue, N., Ito, S., Kai, S., Nakao, T., Ty, S., 2006. Re-assessment of woodfuel supply and demand relationships in Kampong Thom Province, Cambodia. *Biomass Bioenergy* 30 (2), 134e143.

Wangchuk, S., Siebert, S., Belsky, J., 2014. Fuelwood use and availability in Bhutan: implications for national policy and local forest management. *Hum. Ecol.* 42 (1), 127-135.