

REPÚBLICA DOMINICANA

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/RepublicaDominicana>

Documento preparado por Raúl Tauro, José Luis Caballero 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.

Luego de la reunión llevada a cabo en El Salvador en Mayo de 2018, se decidió separar los potenciales 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. 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 y recurso por 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	4
Índice de Tablas	4
Introducción.....	5
Inventario de la biomasa	8
Biomasa forestal	8
Subproductos del aprovechamiento y la industria forestal	8
Plantaciones forestales dedicadas.....	9
Aprovechamiento de bosques nativos.....	12
Biomasa de residuos agrícolas.....	14
Subproductos agrícolas, pecuarios y agroindustriales	14
Cultivos energéticos.....	18
Residuos urbanos	20
Metodología	21
Línea de base	21
Selección de la base espacial.....	22
Módulo de demanda	22
Módulo de oferta	25
Subproductos del aprovechamiento y la industria forestal	25
Plantaciones forestales dedicadas.....	25
Aprovechamiento de bosques nativos.....	25
Biomasa de residuos agrícolas.....	26
Subproductos agrícolas, pecuarios y agroindustriales	26
Cultivos energéticos.....	26
Residuos urbanos	27
Módulo de integración	27
Áreas prioritarias, oferta potencial comercial y delimitación de áreas de oferta.....	28
Análisis del consumo actual	28
Oferta potencial para calor y electricidad.....	29
Uso de leña y carbón vegetal: biomasa “tradicional”	30

Modulo de demanda	33
Módulo de oferta	34
Módulo de oferta vs demanda: simulación dinámica de eventos de cosecha y revegetación del paisaje por crecimiento natural.....	35
Direcciones futuras de trabajo.....	36
Análisis prospectivo (escenario pesimista, tendencial y optimista) hacia 2030	38
Conclusiones generales del estudio de caso	38
Bibliografía	39

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Estadísticas básicas sobre energía y bioenergía en RD (IRENA, 2016).....	6
Figura 2. Áreas con potencial para plantaciones forestales para energía.	11
Figura 3. Distribución espacial de accesibilidad de biomasa aprovechable para energía y proveniente de bosques, matorrales y manglares.....	13
Figura 4. Potencial de residuos agrícolas por región.....	14
Figura 5. Distribución de producción bovina (Número de cabezas)	15
Figura 6. Distribución de producción avícola (Número de cabezas).....	16
Figura 7. Distribución de producción porcina (Número de cabezas)	17
Figura 8. Área potencial para el cultivo de caña de azúcar.....	18
Figura 9. Área potencial para el cultivo de palma de aceite	19

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Subproductos de la extracción forestal y la industria maderera	9
Tabla 2. Potencial teórico para la producción de energía a partir de plantaciones forestales.....	10
Tabla 3. Existencias y productividad de combustibles de madera provenientes de bosques naturales ..	12
Tabla 4. Potencial energético residuos agrícolas y agroindustriales	15
Tabla 5. Potencial energético residuos pecuarios en función de excretas.....	17
Tabla 6. Potencial técnico para la producción de etanol y biodiesel.	20
Tabla 7. Potencial técnico máximo de la producción de biogás a partir de residuos sólidos urbanos	21
Tabla 8. Coeficientes preliminares para el uso de diferentes recursos biomásicos.....	24
Tabla 9. Demanda actual de biomasa en el sector industrial y eléctrico	29
Tabla 10. Potencial técnico total de recursos biomásicos para uso energético.....	30

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 (cocción de alimentos con leña en zonas rurales y periurbanas). Alrededor del 35% restante se utiliza con tecnologías modernas, de los cuales el 26% se usa en generación de calor, el 3% para generación de energía y el 6% en el sector transporte (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.

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 consideran proyectos para producción de electricidad con biomasa, y para uso de biogás y biocombustibles líquidos, tal es el caso de Guatemala, República Dominicana y Nicaragua (LCMEXL, 2017).

En República Dominicana la bioenergía cubre el 15% de la demanda energética final (figura 1), de la cual el 7.6% se usa en el sector residencial o comercial. El porcentaje restante de biomasa se usa en el sector industrial, donde el 55% de la oferta proviene de fuentes diferentes a la forestal, principalmente de residuos agrícolas. En este sector, la biomasa es utilizada principalmente para generar energía eléctrica en la región este del país. Por otro lado, en los últimos años se han apoyado proyectos para la construcción de briquetas para ser usadas en pequeñas y medianas industrias como; lavanderías y fábricas de ladrillo (LCMEXL, 2017).

En este contexto, existen pocos estudios que evalúen el potencial de bioenergía en República Dominicana, y menos aún, estudios de potencial energético que utilicen Sistema de Información Geográfico (SIG) como herramienta de análisis. Uno de los estudios más importantes es el "Reporte intermedio del estudio de biomasa" (UNALM, 2017), en el cual se generó un inventario de fuentes biomásicas disponibles en la región fronteriza del país, contemplando residuos agrícolas y forestales. Además, el mismo reporte identificó y analizó información disponible sobre estudios y proyectos relativos a bioenergía en República Dominicana, entre los que se destacan:

- Estudio de Base de Biomasa Disponible para la Generación Industrial de Calor y Energía Eléctrica, desarrollado para la Comisión Nacional de Energía en 2017. Los resultados indican que existen cerca de 476 mil hectáreas de alta calidad para la producción de gramíneas y 450 mil hectáreas adecuadas para el cultivo de especies forestales para la producción de energía.
- Estudio sobre la "Disponibilidad de Biomasa para la Generación de Energía en la República Dominicana: Un Análisis Sobre de la Información Existente. Desarrollado para la United Nations Industrial Development Organization.
- El reporte de la IRENA (2016), que estima un potencial de biogás proveniente de vertederos que podría alcanzar un total de 220 MW, mientras que los cuatro ingenios azucareros más importantes del país podrían alcanzar 148 MW de cogeneración para suministro de calor y electricidad provenientes de bagazo, el estiércol animal podría generar 9 MW de biogás, y la co-combustión conjunta de biomasa y carbón en plantas eléctricas podría suministrar otros 70 MW.
- Estudio Base Sobre La Producción Y Comercialización De Oleaginosas Para Biodiesel En La República Dominicana.
- Estudio para la Zona Franca Industrial de Santiago en 2016, de Gas Natural Fenosa. Señala como biomasa potenciales al arroz (tallos y cascarillas), al Café (pulpa y paja), bagazo de caña y al plátano y guineo.
- Valerio (2015), señala que las biomasa potenciales agroindustriales son el bagazo de caña, la cascarilla y tallos de arroz, los desperdicios de la industria bananera, cascarilla de arroz, pulpa de café y residuos de palma y maní.

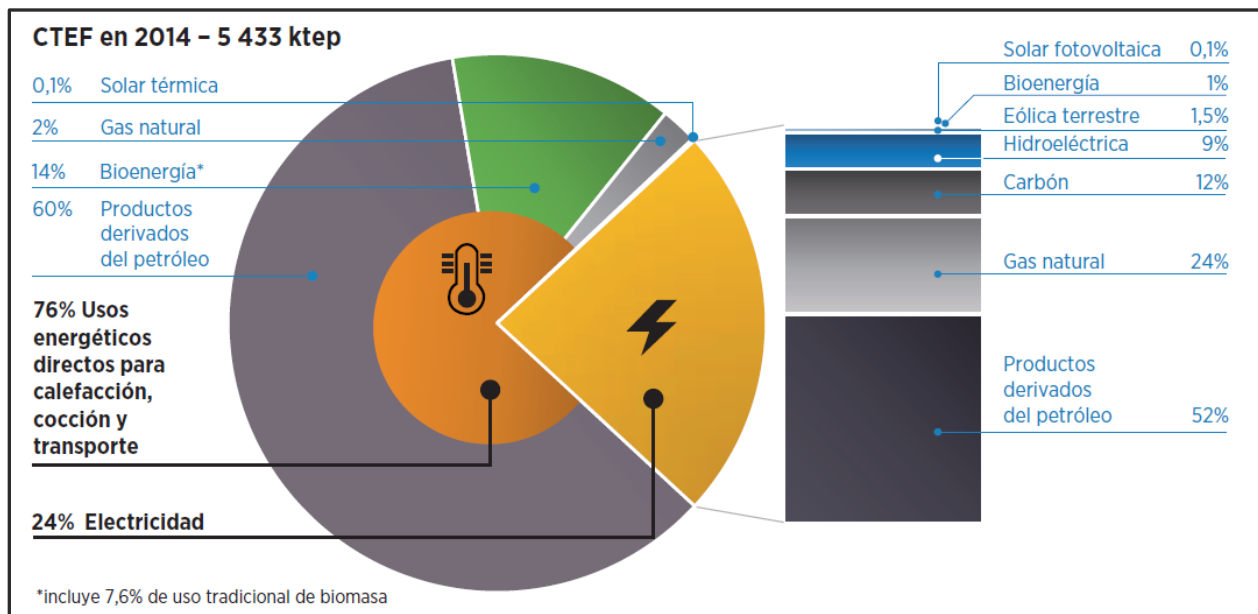


Figura 1. Estadísticas básicas sobre energía y bioenergía en RD (IRENA, 2016)

Del resumen de trabajos presentados anteriormente, el Estudio de Base de Biomasa Disponible para la Generación Industrial de Calor y Energía Eléctrica (Checo y de Frías, 2017), utiliza ARC-GIS y otras herramientas de SIG para analizar y combinar variables edafológicas, climáticas y de uso actual de suelos de la República Dominicana para ubicar, identificar y cuantificar las mejores superficies del país

para producción a gran escala de gramíneas y de especies arbóreas de rápido crecimiento para la generación de biomasa para energía. Sin embargo, no existen hasta el momento en el país, estudios espacialmente explícitos y con proyección a futuro sobre la oferta y demanda, que integren los recursos biomásicos más importantes para la producción o uso energético.

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 República Dominicana 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. Algunos de estos recursos ya se utilizan con fines energéticos (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, se estimará también 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 permitan 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, mitigación del cambio climático y 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 República Dominicana, 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 República Dominicana. 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, aquéllas 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 obtener vapor de proceso o para cogeneración. Los Residuos Sólidos Urbanos (RSU) son otro recurso biomásico utilizados principalmente para la producción de energía eléctrica en ciudades, como solución al problema que ocasiona el manejo y la disposición final de los mismos.

BIOMASA FORESTAL

República Dominicana cuenta con una importante superficie cubierta de bosques que comprende aproximadamente el 39% de su territorio (POA, 2017). Los bosques están sujetos a la producción maderable sustentable, excepto los que están sujetos a protección y conservación, siendo una fuente de producción y abastecimiento de subproductos aptos 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 comprenden a ramas, puntas, 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 9.1 PJ/año; de éstos, 7 PJ/año corresponden a subproductos de la extracción forestal y 2.1 PJ/año a la industria maderera (Tabla 1). Es importante notar que estos recursos, tienen una dispersión espacial mucho menor que los provenientes de bosques nativos. Esta diferencia debe ser considerada al plantear opciones de aprovechamiento y evaluar las cadenas logísticas apropiadas para su uso final.

Tabla 1. Subproductos de la extracción forestal y la industria maderera

Biomasa	Volumen de la producción forestal maderable o aserrada (Millones de m ³ r)	Coefficiente de generación de residuos (%)	Existencias de residuos con potencial energético (Millones de tMS/año)	Equivalente en energía primaria (PJ/año)
Subproductos de la extracción forestal	1.4	0.5	0.35	7.0
Subproductos de la industria maderera	0.42	0.5	0.10	2.1
TOTAL				9.1

CONSUMO ACTUAL

La principal materia prima que se utiliza en la industria maderera son las coníferas, que tienen como productos principales la leña y el carbón. Sin embargo, la industria del aserrío tiene un crecimiento positivo en los últimos años, con lo cual se espera un incremento en los subproductos generados, aptos para diversificar el uso energético de los recursos.

PLANTACIONES FORESTALES DEDICADAS

FUENTES DE PRODUCCIÓN

La experiencia actual en plantaciones forestales es reducida comparada con otros países como Brasil o los del sudeste asiático. Actualmente existen aproximadamente 70,000 has de plantaciones (Díaz, 2008). Las especies forestales más utilizadas para la reforestación son latifoliadas, como la *Acacia mangium* (especie introducida); y las coníferas *Pinus occidentalis* (nativa) y *P. caribaea* (introducida) (UNALM, 2017).

Para la estimación del potencial energético proveniente de plantaciones 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.

De acuerdo con las superficies obtenidas de los mapas, 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.

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

Categoría (índice de aptitud)	Superficie (Millones de ha)	Productividad promedio (tMS/ha/año)	Disponibilidad madera para energía (Millones de tMS/año)	Equivalente en energía primaria (PJ/año)
1 – 0.6	2.3	7.2	14.9	298
0.6 – 0.3	2.2	4.7	9.3	186
0.3 – 0.05	0.3	2.5	0.7	14
TOTAL				498

CONSUMO ACTUAL

Las plantaciones actualmente no tienen uso energético exclusivo. Al igual que los bosques manejados, el principal uso de la madera es para construcción, postes, muebles, y en menor medida, para la producción de carbón vegetal.

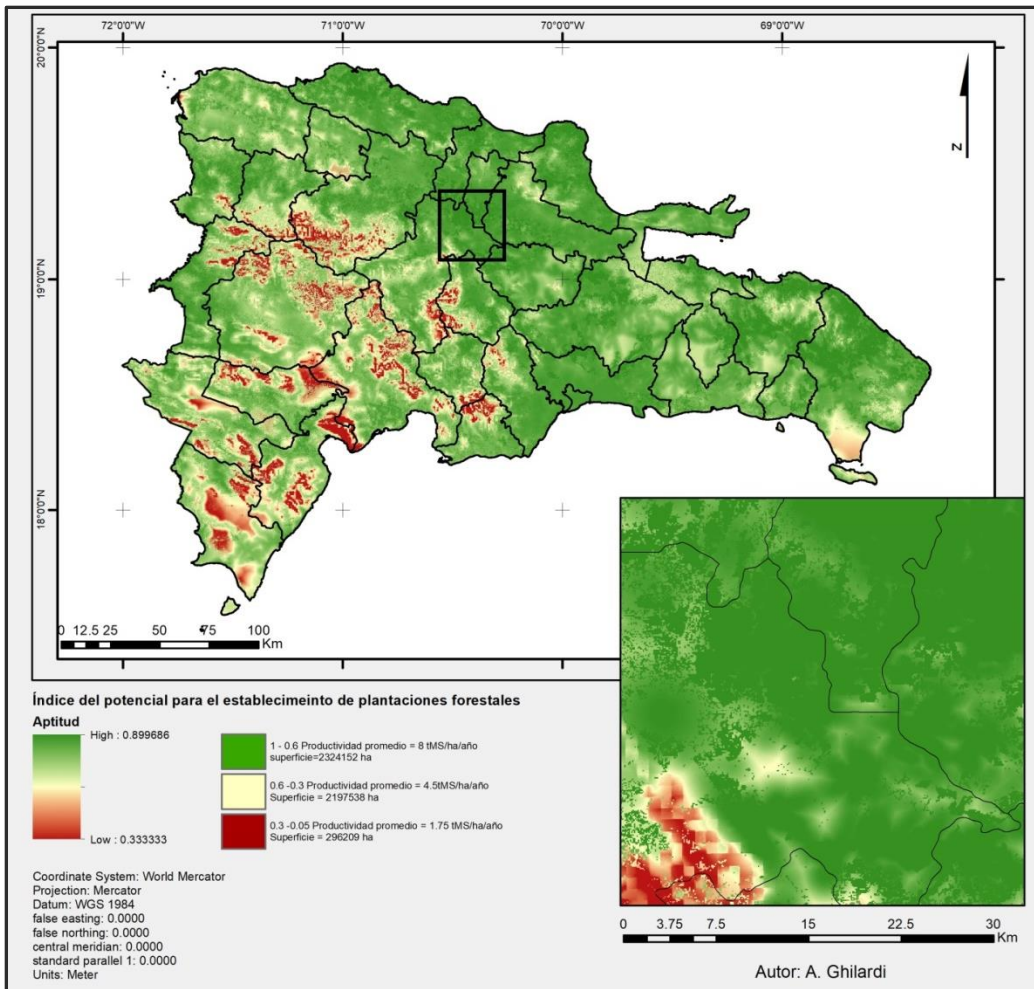


Figura 2. Áreas con potencial para plantaciones forestales para energía.

APROVECHAMIENTO DE BOSQUES NATIVOS

FUENTES DE PRODUCCIÓN

De las 1.6 Mhas de bosques, sólo el 3% está bajo manejo forestal. Esto quiere decir que existe un enorme potencial de biomasa actualmente no explotada con posibilidades de aprovechamiento. 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 excluyen las partes de los árboles y arbustos que se destinan a usos no energéticos (madera para aserrar, para construcción, celulosa y papel, etc.). Se supone el uso energético de los bosques como complemento y no como uso exclusivo.

Existe un potencial muy importante en los bosques que podría ser aprovechado con fines energéticos. Debido a que esta actividad se realiza en superficies extensas, es muy importante considerar los costos asociados a la extracción de los residuos del bosque. Estos costos dependen principalmente del acceso a tecnologías eficientes para la extracción de madera, y de las condiciones de la infraestructura de caminos.

Tabla 3. Existencias y productividad de combustibles de madera provenientes de bosques naturales

Formación	Superficie accesible Millones ha	Productividad tMS/ha/año	Incremento anual de madera para energía tMS/año	Equivalente en energía primaria PJ/año
Bosque	1.6 – 0.7	0.96	1.54 – 0.67	30.8 – 13.4
Matorral	2.6 – 1.3	0.84	2.18 – 1.09	43.6 – 21.8
Mangle	0.03 – 0.01	6.00	0.18 – 0.06	3.6 – 1.2
TOTAL				78.0 – 36.4

CONSUMO ACTUAL

La biomasa proveniente de los bosques nativos se utiliza principalmente para la producción de leña y carbón, se calcula que aproximadamente el 10% de biomasa se usa con estos fines (Díaz, 2008).

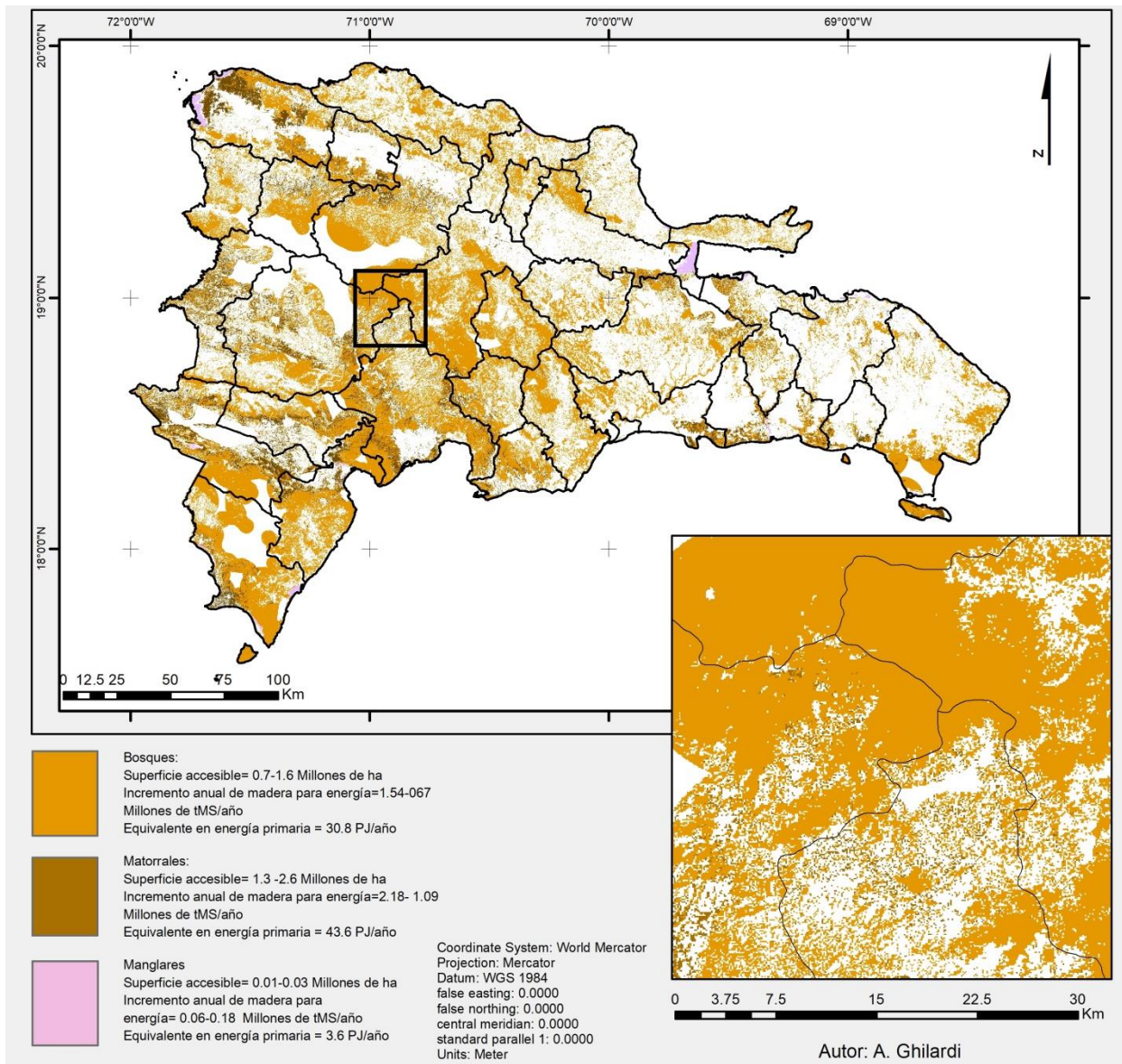


Figura 3. Distribución espacial de accesibilidad de biomasa aprovechable para energía y proveniente de bosques, matorrales y manglares.

BIOMASA DE RESIDUOS AGRÍCOLAS

Actualmente sólo están sembradas el 16% de las tierras cultivables en República Dominicana (UNALM, 2017). Esto se traduce en un enorme potencial de tierras aptas para cultivos, que a su vez resulta en un incremento de la producción y disponibilidad de residuos potenciales para usos energéticos.

SUBPRODUCTOS AGRÍCOLAS, PECUARIOS Y AGROINDUSTRIALES

FUENTES

En la figura 4 se pueden observar las regiones donde están distribuidos los residuos agrícolas más importantes del país. Los residuos de los cultivos de arroz y coco se encuentran localizados principalmente en la región nordeste, mientras que existe un gran potencial de residuos de guineo en el noreste. Es muy importante conocer la ubicación de los residuos respecto a los usuarios, para diseñar cadenas de suministro óptimas y costo-efectivas.

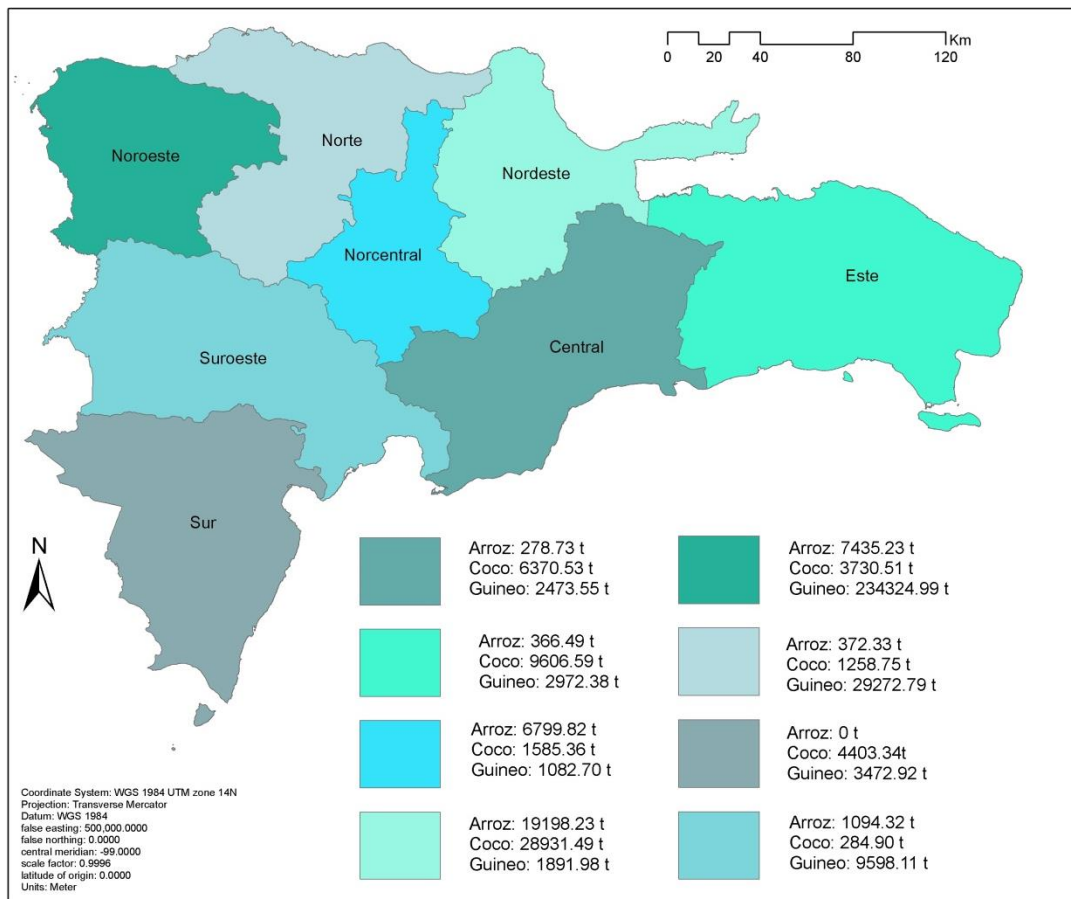


Figura 4. Potencial de residuos agrícolas por región

En base a la cantidad total de residuos por región, se pudo determinar el potencial energético máximo de aprovechamiento, donde el guineo produce más de 285 mil toneladas de residuos al año (4.27

PJ/año), que representa una potencia máxima para generar más de 50 MWe, considerando su uso en una central térmica con tecnología de turborreactor.

Tabla 4. Potencial energético residuos agrícolas y agroindustriales

Cultivo	Residuo generado	Producción anual residuos (miles de toneladas)	PCI (PJ/MMt)	Potencial energético (PJ/año)
Arroz	Rastrojo	35.5	15	0.53
Coco	Cáscaras	52.2	15	0.78
Guineo	Raquis	285	15	4.27
TOTAL				5.58

En el sector pecuario, se consideran los animales criados en establos. La biomasa residual corresponde a las excretas de los animales que por sus propiedades físico-químicas pueden ser tratadas mediante digestión anaerobia para la obtención de biogás. Las figuras 5-7 muestran la distribución de la producción animal en el país, considerando al ganado criado en establos.

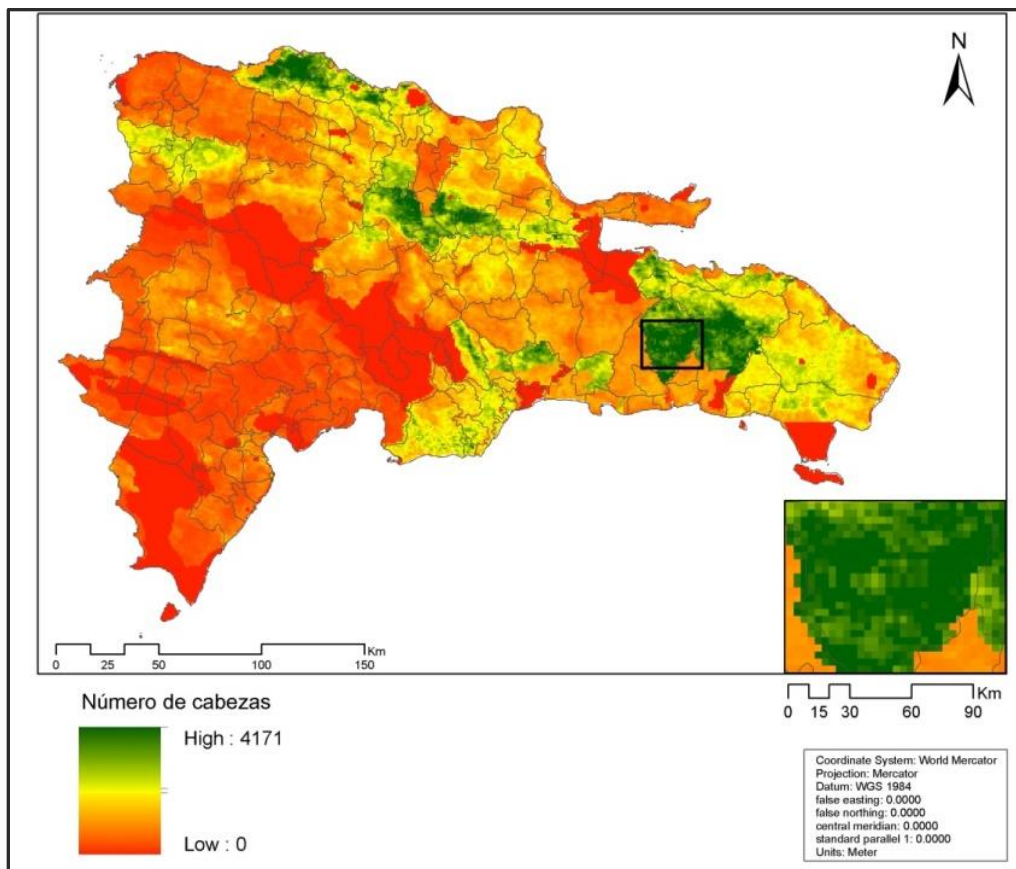


Figura 5. Distribución de producción bovina (Número de cabezas)

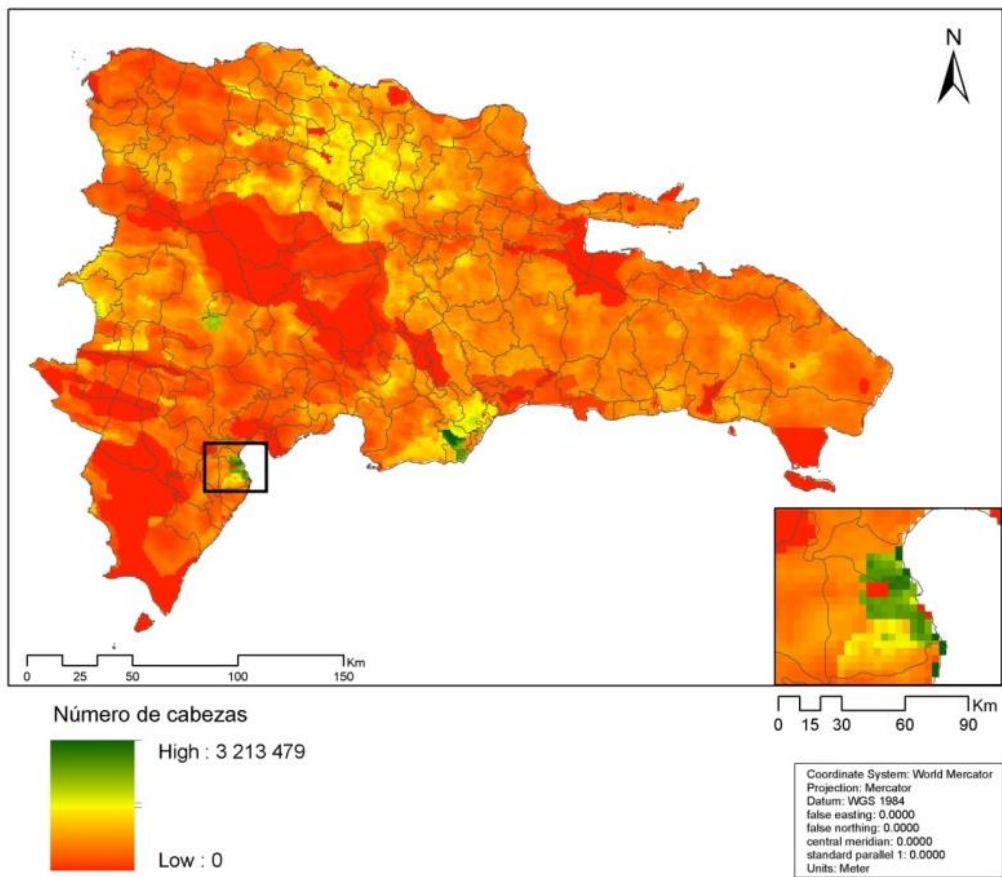


Figura 6. Distribución de producción avícola (Número de cabezas)

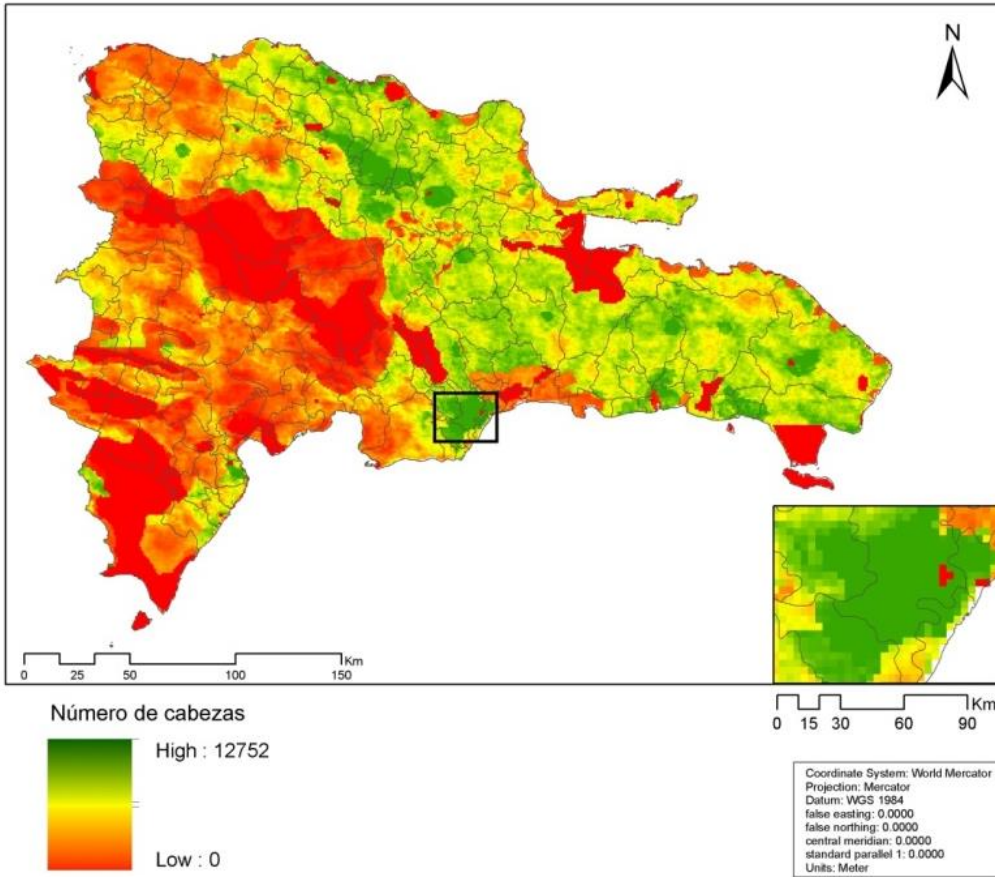


Figura 7. Distribución de producción porcina (Número de cabezas)

En la siguiente tabla 5 se detallan los totales de cabezas de ganado producidas en el país. El mayor potencial de producción de biogás proviene de los criaderos de pollo, que podrían generar el equivalente de 4.2 GWe al año.

Tabla 5. Potencial energético residuos pecuarios en función de excretas

Especie pecuaria	Cantidad de cabezas Millones/año	Producción de excretas kg/cabeza/año	Coef. Generación biogás m ³ /kg excreta	Generación biogás Millones m ³ /año	Equivalente energético PJ/año
Pollos	399	15	0.04	239.4	5.1
Res	0.18	1,300	0.03	7.0	0.2
Cerdos	1.67	200	0.06	20.0	0.4
TOTAL				266.5	5.7

CONSUMO ACTUAL

No existe actualmente un consumo formal de los residuos agrícolas con fines energéticos. Sin embargo, es creciente el número de proyectos industriales que comienzan a aprovechar residuos agroindustriales

para autoconsumo, ya sea para la producción de calor industrial o para cogeneración. Las tecnologías de uso final principalmente empleadas son las calderas de vapor y los gasificadores.

CULTIVOS ENERGÉTICOS

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.

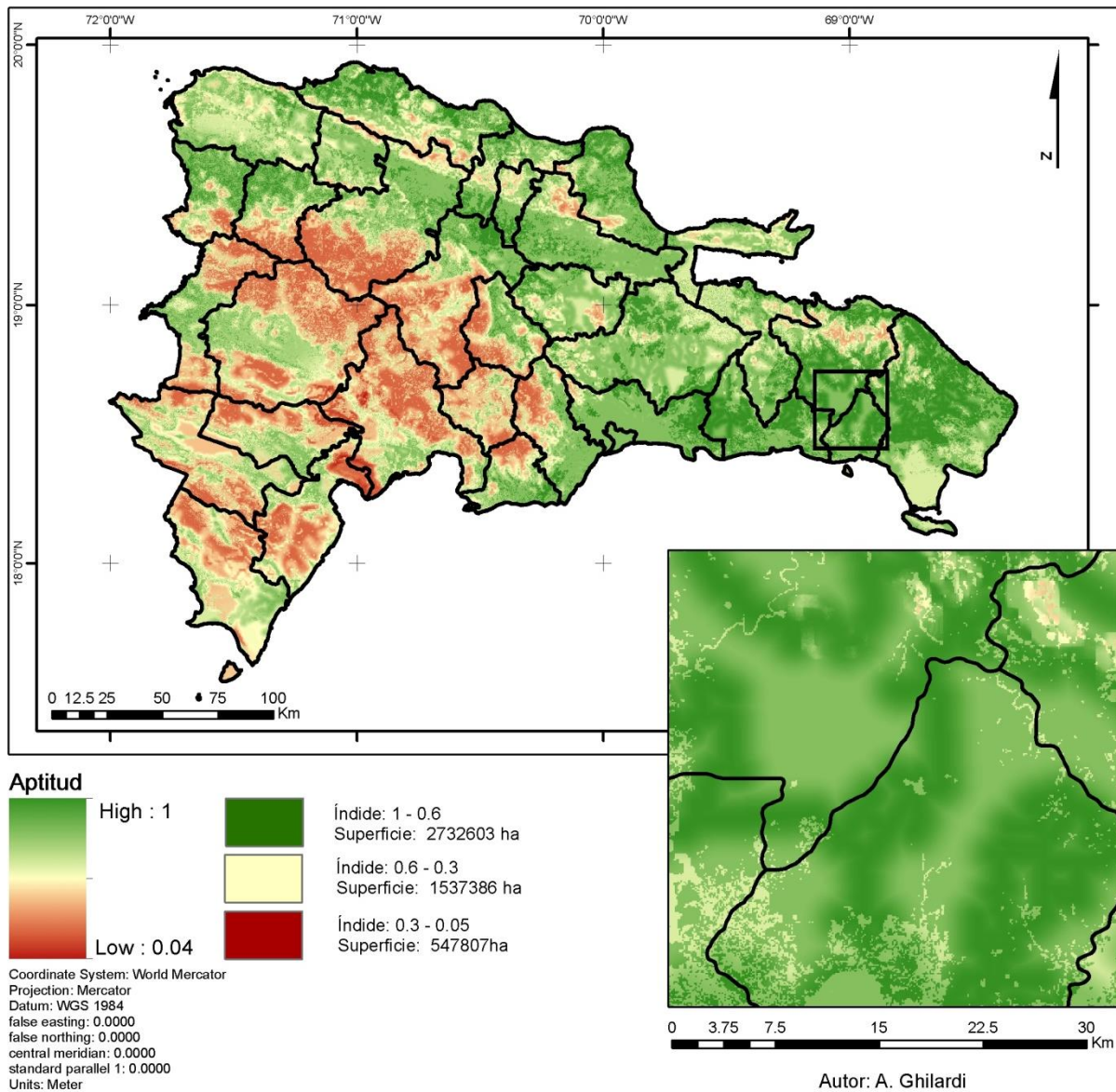


Figura 8. Área potencial para el cultivo de caña de azúcar

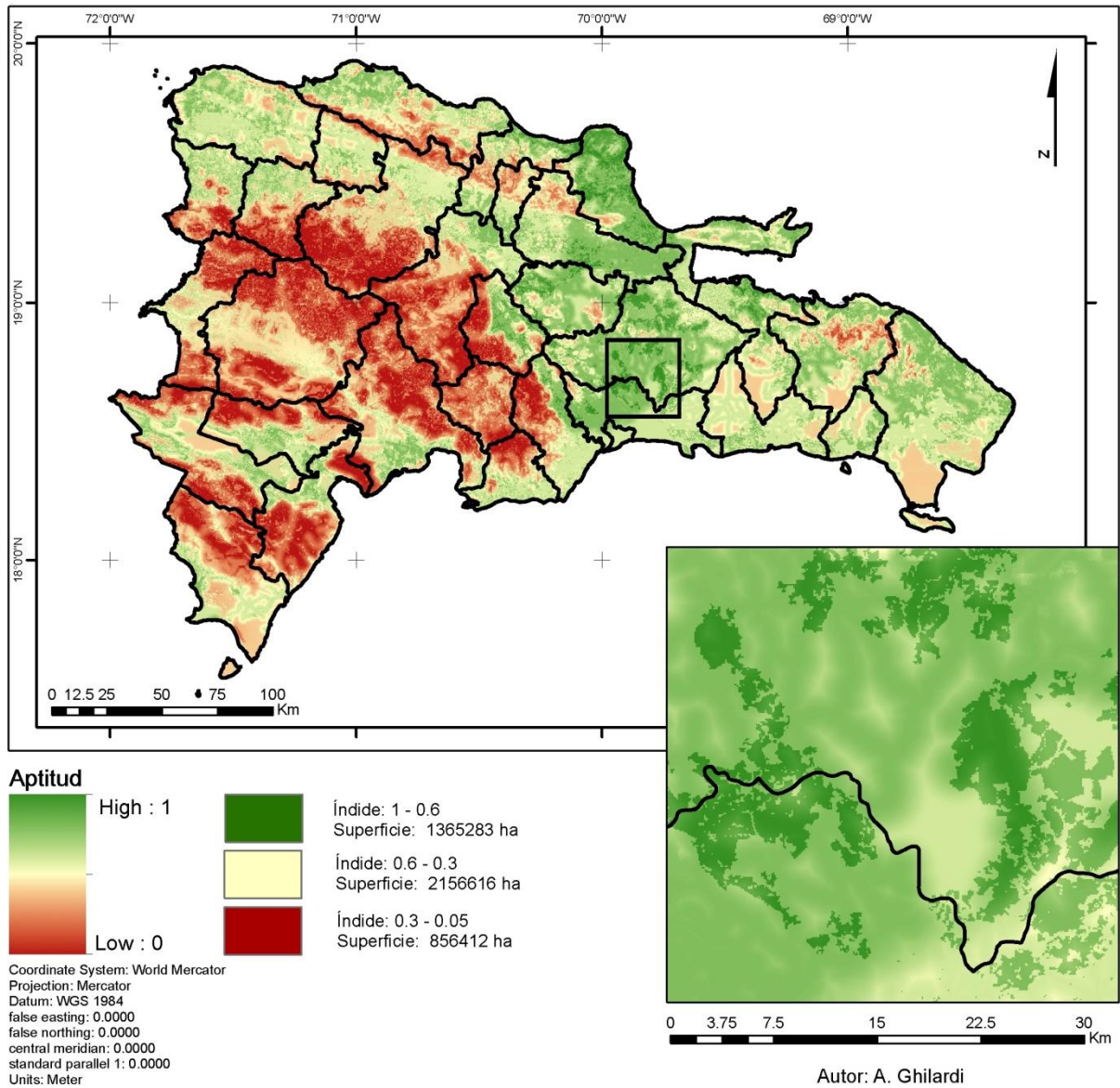


Figura 9. Área potencial para el cultivo de palma de aceite

En la tabla se resumen los potenciales de cada cultivo según el índice de aptitud del terreno. Es importante notar que el biodiesel de palma tiene el mayor potencial energético, superando los 758 PJ/año. Sin embargo se debe aclarar que se trata de un potencial teórico máximo. Tanto en el caso del etanol como en el de la palma se debe considerar entre otros aspectos, la competencia del uso de suelos para alimentación.

Tabla 6. Potencial técnico para la producción de etanol y biodiesel.

Cultivo	Categoría (índice de aptitud)	Superficie cosechada (ha)	Rendimiento cultivo (t/ha)	Producción (t)	Rendimiento producción de biocombustible (millones de litros)	Equivalente energético (PJ/año)
Etanol						
Caña azúcar	1 – 0.6	2732603	80	109304120	7651.3	179.0
	0.6 – 0.3	1537386	80	61495440	4304.7	100.7
	0.3 – 0.05	547807	80	21912280	1533.9	35.9
TOTAL						315.7
Biodiesel						
Palma aceite	1 – 0.6	2156616	13	28036008	8410.8	373.4
	0.6 – 0.3	1365283	13	17748679	5324.6	236.4
	0.3 – 0.05	856412	13	11133356	3340.0	148.3
TOTAL						758.1

CONSUMO ACTUAL

No existen datos de la demanda actual

RESIDUOS URBANOS

Actualmente existen más de 350 vertederos diseminados a cielo abierto a lo largo de todo el país, ocupando una superficie aproximada de 148 km², generando impactos ambientales y dañando la salud de la población. Dentro de los vertederos, los residuos sólidos urbanos están conformados por una importante fracción de residuos orgánicos, que pueden ser descompuestos bajo condiciones anaerobias para liberar grandes cantidades de gas que podría ser aprovechado con fines energéticos.

Es importante mencionar que para estimar el potencial técnico real para la producción de biogás, es necesario clasificar y diferenciar los sitios de disposición final de aquellos rellenos sanitarios que poseen el diseño y las características técnicas adecuadas para el manejo de los residuos y su aprovechamiento energético.

FUENTES

Tabla 7. Potencial técnico máximo de la producción de biogás a partir de residuos sólidos urbanos

Producto o desecho	Generación total (Millones de ton/año)	Basura orgánica en rellenos sanitarios (Millones de ton)	Rendimiento de Biogás (m ³ /t)	Equivalente en energía primaria (PJ/año)
Residuos sólidos urbanos	8.52	5.54	80	7.5

CONSUMO ACTUAL

Actualmente no se aprovechan los residuos para generar energía. La mayoría de los vertederos son a cielo abierto y no cuentan con planes de manejo, control ambiental ni sistemas de prevención de contaminación.

METODOLOGÍA

Como se describió en la sección sobre el inventario de la biomasa en República Dominicana, los recursos biomásicos que se evaluaron 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, gaseosos y líquidos. A continuación se detallan los pasos seguidos para la determinación del potencial en cada caso.

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 y géneros autorizados.

Tabla 2: Falta actualizar la productividad promedio de acuerdo a las condiciones locales de crecimiento. Sería necesario referenciar las calidades de suelo con las condiciones de aptitud de plantaciones.

Tabla 3: Ídem anterior

Tabla 4 y Figura 4: Faltan capas del cultivo de caña o de sus residuos, siendo la caña de azúcar el principal cultivo de RD. Se puede actualizar la tabla con cultivos que se consideren de interés regional.

Figura 5 -7: Faltan capas de la distribución de establos y sus producciones (o números de cabezas)

Tabla 6: Referenciar las calidades de suelo con las condiciones de aptitud para los diferentes cultivos.

Tabla 7: Faltan capas sobre rellenos sanitarios y sus respectivas capacidades

SELECCIÓN DE LA BASE ESPACIAL

La base espacial seleccionada varía conforme a los diferentes recursos, 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 su parte, 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 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 hace referencia las filas de la tabla en cuestión, 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 de bioenergía puede estar destinada a satisfacer necesidades de cocción, para generar energía térmica, eléctrica, o para sustituir gasolina o diésel en el sector transporte. Dadas las condiciones de usos actuales de la biomasa en República Dominicana, en este trabajo se analiza la demanda en el sector residencial y en el sector industrial-eléctrico, destacando principalmente por el uso de biocombustibles sólidos.

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 uso creciente en el sector industrial y eléctrico.

Cada vez son más las empresas, principalmente agroindustrias, que aprovechan sus residuos para la producción de vapor de proceso, la generación de frío y la cogeneración. También el sector eléctrico utiliza biomasa, principalmente bagazo de caña de azúcar, para generar electricidad para autoconsumo o para subir a la red eléctrica nacional. En la tabla 9 se detalla la demanda actual de biomasa en las principales empresas del país.

Para estimar la demanda de biomasa para usos térmicos y eléctricos se utilizó 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 de biomasa en el sector industrial se consideraron 3,500 horas de operación de la caldera y una eficiencia de la misma del 80%. Para la demanda del sector eléctrico, se utilizó un factor de carga del 75% y la eficiencia de planta del 30%. 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 8 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.

Tabla 8. Coeficientes preliminares para el uso 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	35	10	Producción vapor de proceso	85
Caña de azúcar	Bagazo	50	40	Cogeneración	78
Forestal	Astilla	35	35	Cogeneración	85
Forestal	Pellet	35	10	Cogeneración	85
Forestal	Astilla	35	35	Electricidad	30
Forestal	Pellet	35	10	Electricidad	30
Forestal	Leña	50	40	Calefacción	70
Forestal	Astilla	35	35	Calefacción	80
Forestal	Pellet	35	10	Calefacción	90
Forestal	Leña	50	40	Cocción	18
Forestal	Astilla	35	35	Cocción	30
Forestal	Pellet	35	10	Cocción	30

En la tabla se puede ver la eficiencia de planta de forma resumida. A modo detallado, se puede determinar la potencia que podría ser instalada en función del potencial energético de los recursos, 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 (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 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 (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.

MÓDULO DE OFERTA

Para estimar el potencial de biomasa proveniente de bosques y plantaciones dedicadas apta para uso energético, se utilizó un Sistema de Información Geográfica (SIG) para el procesamiento de la información geo-estadística. En el caso de los subproductos del aprovechamiento y de la industria forestal, de los RSU y de los residuos en el sector agrícola-pecuario, se utilizó información existente de la producción anual y se la afectó 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 de (Díaz, 2008), considerando una superficie bajo manejo forestal de 48,000 has y una productividad promedio de 30 m³/ha/año. El volumen de madera aserrada considera la proporción de la producción o extracción forestal que se destina a la industria del aserrío, estimada en un 30 % (UNALM, 2017). 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 20 Gigajoules/tMS.

PLANTACIONES FORESTALES DEDICADAS

Se utilizó un método multicriterio ligado a un SIG y se calculó un índice basado en 5 criterios claves que determinan la calidad de un sitio para el establecimiento de plantaciones energéticas representado como el índice de aptitud: 1) coberturas con vegetación secundaria; 2) pendientes menores a 15° (el programa utilizado trabaja con ángulos); 3) superficie accesible físicamente alrededor de localidades y al costado de carreteras principales; 4) clasificación del suelo; y 5) precipitaciones totales anuales mayores a 800 mm. Se utilizaron las capas de cobertura del Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales y del Ministerio de Agricultura.

Se obtuvieron superficies con diferente potencial para el establecimiento de plantaciones forestales (0=bajo, 1=alto). 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 0.5 tMS/ha/año para suelos pobres con baja precipitación, hasta 10 tMS/ha/año para suelos muy ricos con alta precipitación. Para la estimación de la disponibilidad de madera para energía se utilizó un coeficiente de aprovechamiento energético de 0.9 y un contenido energético de la madera de 20 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 del Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales y del Ministerio de Agricultura. Los valores de productividad volumétrica se obtuvieron del (Mäser et al., 2009). Estos valores de productividad consideran el factor de uso energético para cada tipo de cobertura y 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. Se utilizó un peso específico promedio de la madera de 0.5 tMS/m³ y un contenido energético promedio de 20 Gigajoules/tMS. El coeficiente de acceso máximo a los bosques es 5 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

Las existencias de subproductos agrícolas y agroindustriales para uso energético se obtuvieron a partir de las capas referenciadas al Ministerio de Agricultura. Se consideró la producción de los principales cultivos que participan con más del 5% en la producción total anual (excluyendo la caña de azúcar que no cuenta con información espacial). Para estimar el potencial energético de los residuos, se consideró un poder calorífico inferior promedio de 15 PJ por millón de toneladas.

Respecto al potencial energético de los residuos pecuarios, el número de cabezas por especie se obtuvo de TGMI (2011) y del reporte de producción pecuaria, 2002-2016 MEM (2017), los coeficientes de producción de excretas por cabeza y los coeficientes de generación de biogás se obtuvieron de (Ríos y Kaltschmitt, 2013). Se consideró un contenido energético promedio de 20 MJ/m³ de biogás.

CULTIVOS ENERGÉTICOS

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 44.4 MJ/litro.

RESIDUOS URBANOS

Para calcular el potencial técnico de aprovechamiento energético de los rellenos sanitarios controlados, la generación de residuos anual a nivel nacional se calculó en base a la generación promedio por habitante por día (0.8 kg/hab/día) de los cuales el 65% son residuos orgánicos (OPS, 2003), multiplicada por el número de habitantes del país. Se utilizó la siguiente ecuación considerando la producción de biogás en un año:

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

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.

ÁREAS PRIORITARIAS, OFERTA POTENCIAL COMERCIAL Y DELIMITACIÓN DE ÁREAS DE OFERTA

De acuerdo a la información espacial analizada, las áreas más promisorias para la producción u obtención de recursos biomásicos provienen del sector forestal, principalmente de las plantaciones forestales. En la tabla 2 se estimó que existen casi 5 millones de hectáreas que podrían ser asignadas a plantaciones forestales, aunque deben considerarse aspectos técnicos, económicos, además de criterios de sustentabilidad, para el aprovechamiento de estas áreas potenciales. Respecto al aprovechamiento de bosques nativos, el mayor potencial energético resulta del aprovechamiento de biomasa que se encuentra con disponibilidad inmediata en los matorrales y bosques, principalmente en la región centro y sur del país.

ANÁLISIS DEL CONSUMO ACTUAL

Como se comentó anteriormente, la demanda actual de biocombustibles sólidos en República Dominicana se divide en dos escalas de uso según el sector económico en el que cubran necesidades energéticas. Pequeña escala, para el sector residencial y comercial, y gran escala, para los sectores industrial y eléctrico.

Para uso a gran escala en los sectores industrial y eléctrico alcanza los 3.63 PJ/año, que representa el 0.4 % del potencial técnico máximo, como se explica en la sección de Oferta Potencial. Esto quiere decir que existe un excedente muy importante de biomasa para cubrir la demanda actual de bioenergía, sin embargo, será necesario actualizar la tabla 9 de acuerdo a los proyectos que se vayan generando en el país.

Tabla 9. Demanda actual de biomasa en el sector industrial y eléctrico

Sector	Nombre empresa o proyecto	Residuo utilizado	Potencia instalada (MW)	Consumo de biomasa (tMS/año)	Equivalente energético (PJ/año)
Industrial	Cervecería Nacional Dominicana	Bagazo de malta	0.6	626	0.01
	Pasteurizadora Rica	Chips de madera, pellets y cascarilla de arroz	0.54	473	0.01
	Punta Cana Laundry Services	Restos de podas	0.54	473	0.01
Eléctrico	San Pedro Bio Energy	Bagazo caña azúcar	30	150,171	2.25
	Prodal	Cascarilla arroz	1	5,006	0.08
	Bio Thermal Solutions dominicana	Pastos tropicales	10	50,057	0.75
	Cristóbal Colón	Bagazo caña de azúcar	7	35,040	0.53
TOTAL				241,846	3.63

OFERTA POTENCIAL PARA CALOR Y ELECTRICIDAD

Actualmente, República Dominicana 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, alcanzando los 891 PJ/año. El mayor potencial proviene de las plantaciones forestales, sin embargo, es importante aclarar que se trata de un potencial teórico máximo, que no contempla aspectos técnicos ni económicos de producción. Además, es importante aclarar que este potencial se calculó considerando que la calidad de los suelos es la misma en todas las regiones del país.

En el sector agrícola y pecuario, el mayor potencial técnico proviene de los residuos primarios y secundarios de los cultivos, principalmente de la caña de azúcar, siendo el cultivo de mayor producción anual en el país. Este es el sector con mayor posibilidad de uso inmediato de bioenergía porque cuenta con el recurso disponible a bajo costo, además, las adecuaciones tecnológicas de la planta junto a la logística de manejo de los residuos implican costos menores en la mayoría de los casos.

Los RSU tienen un importante potencial que proviene de la producción de gases de vertederos por la degradación de los residuos orgánicos en los rellenos sanitarios. Para poder aprovechar este potencial, es necesario evaluar la viabilidad técnica y legal del manejo de residuos, así como la disponibilidad tecnológica de uso final.

Tabla 10. Potencial técnico total de recursos biomásicos para uso energético “moderno”

Recurso	Residuo/producto generado	Potencial energético (PJ/año)
Sector forestal		
Subproducto de extracción y de la industria de transformación	Puntas, ramas, recortes, aserrín, costaneros	9
Plantaciones dedicadas	Leña	498
Bosques nativos	Leña	78
Sector agrícola y pecuario		
Cultivos	Bagazo, cáscaras, raquis	6
Especies pecuarias	Excretas	6
Residuos urbanos		
Residuos sólidos	Orgánicos	106
TOTAL		703

A este total debe sumarse el potencial teórico máximo de los cultivos energéticos dedicados (758 PJ/año), con lo cual se obtendría un potencial total de 1461 PJ al año.

USO DE LEÑA Y CARBÓN VEGETAL: BIOMASA “TRADICIONAL”

La extracción y quema de biomasa leñosa a tasas que superan la revegetación (es decir, la extracción no renovable de biomasa leñosa aérea, o NRB por sus siglas en inglés) genera emisiones netas de CO₂. Para evaluar la degradación forestal causada por la extracción desmedida de leña, así como su potencial de uso sustentable desarrollamos "MoFuSS" (Modeling Fuelwood Savings Scenarios), un modelo dinámico que simula el efecto espacio-temporal de la cosecha de leña en la vegetación del paisaje y que explica el ahorro en biomasa leñosa no renovable de un consumo reducido.

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 del presente trabajo: Jean-François Mas, Robert Bailis, Rudi Drigo y Omar Masera. Un quinto coautor, Ernesto Vega, ayudó con problemas de código R durante la depuración. Los detalles de contacto del desarrollador están disponibles en afiliaciones de autores.

Dinamica EGO (uno de los freeware necesarios) solo está disponible para el sistema operativo Windows. MoFuSS ha sido probado con éxito en varias configuraciones de Windows 7, 8 y 10 versiones, y en Macs basadas en Intel que usan Boot Camp. No hay hardware recomendado ya que el tiempo total de procesamiento dependerá del tamaño del área de interés seleccionada. Para replicar el área de estudio presente (4 departamentos en el oeste de Honduras), una computadora de escritorio con una CPU Intel i7 a 3.40 GHz con 16 GB de RAM debería tomar alrededor de 24-36 horas para completar cada

uno de los tres procesos más demandantes: IDW submódulo y ambas simulaciones (BaU e ICS) usando 100 realizaciones MC. Un área mucho más pequeña con pocas realizaciones MC tomará un par de minutos usando el mismo equipo. El manual del usuario también proporciona un enlace a los índices IDW ya procesados para la misma área de estudio que se muestra en este trabajo, con el fin de ganar algo de tiempo si se intenta replicar este ejemplo de estudio particular. Tanto los sistemas de 64 bits como los de 32 bits funcionarán (aunque por debajo de 32 bits, algunas cifras se representarán a propósito con una resolución más baja).

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 Honduras (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.

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 2012b, a), el impacto de la cosecha de leña en bosques y 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 (de Montalembert y Clement 1983). 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, Dewees y Arnold 1997, de Waroux y Lambin 2012).

Las generalizaciones generales 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 (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, como los flujos de carbono, ya que el financiamiento del programa a menudo se basa en la generación de créditos 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 (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 fue cuantificar las reducciones esperadas en la cosecha insostenible de biomasa leñosa resultante de intervenciones externas que reducen la demanda de leña. 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 (Maser 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.

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. Estime 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.

MODULO DE DEMANDA

La magnitud y distribución espacial de la demanda de leña se calcula siguiendo la ecuación 2:

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

donde C (t) es el consumo total de leña residencial en tDM para cualquier paso de tiempo "t"; hh_{ij} 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); u_j 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 y 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 velocidades de desplazamiento tanto de los colectores de leña como de las características topográficas como la pendiente, las 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 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 n 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 de siembra gobernado por un mecanismo estocástico. Finalmente, el consumo total de madera comprada 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 bosques: 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", a veces "t" y "t + 1" respectivamente. 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 o al menos mantenga árboles de poda fuera de los bosques y recolecte madera muerta diseminada de áreas no forestales cercanas.

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, que probamos para el caso de Honduras, incorpora 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

El entregable tal como se planteó está completo al 100 por ciento, pero se trata de modelos de simulación espacial y temporal algo pesados, que tardan algunos días en correr en el clúster de cómputo adquirido para tal fin con recursos de este mismo proyecto (80 núcleos a 2.4 GHz cada uno). La última corrida se lanzó para todo el país a 100m de resolución con 100 realizaciones de Monte Carlo (equivalente a 100 repeticiones para evaluar la incertidumbre) y estará completa el Lunes 14 de mayo a las 19:00. El modelo produce de manera automática un reporte completo con los resultados (i.e. potencial técnico de BCSP para aplicaciones térmicas de baja potencia), en forma de texto, gráficas, tablas y animaciones en formato pdf el cual se adjuntará al presente informe como otro Anexo.

CONCLUSIONES GENERALES DEL ESTUDIO DE CASO

República Dominicana depende en gran medida de los combustibles fósiles para cubrir su demanda energética. Sin embargo, la bioenergía tiene un papel importante en la matriz energética nacional, cubriendo aproximadamente el 15% del consumo final de energía. El 7.6% de la bioenergía se usa de forma tradicional en el sector residencial o comercial para cubrir tareas de cocción o calefacción. La otra mitad de biomasa se usa en el sector industrial, donde predomina el uso de residuos agrícolas para generar energía para autoabastecimiento.

Existe un enorme potencial de biomasa en el país que proviene principalmente del sector forestal (585 PJ/año). En el sector agrícola, la caña de azúcar es el cultivo con mayor potencial energético, siendo el sector con mayor posibilidad de aprovechamiento energético de los residuos por contar con los recursos *in situ* y a bajo costo, mientras que en el sector pecuario, la cría de aves de corral genera excretas que podrían ser aprovechadas para generar más de 5 PJ/año. Los RSU son una importante fuente de producción de gases de vertedero que podrían utilizarse para generar electricidad, sin embargo, su aprovechamiento es complejo y está relacionado con aspectos políticos, de organización, sociales, tecnológicos y económicos.

Para mejorar la estimación del potencial técnico de los recursos evaluados, es necesario en primer lugar, afinar la estimación del potencial de las plantaciones forestales diferenciando las calidades de suelos en las diferentes regiones del territorio nacional. Se deben considerar criterios de sustentabilidad para el aprovechamiento y uso de cada residuo, así como considerar sus 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.

BIBLIOGRAFÍA

Díaz, R (2008). Secretaria de Estado de Medio Ambiente y Recursos Naturales. Diagnóstico del sector forestal Dominicano. Taller socialización anteproyecto Ley Federal.

Estudio de uso y cobertura del suelo, 2012 (2014). Informe metodológico y resultado. Dirección de Información Ambiental y de Recursos Naturales. Santo Domingo, D.N. Enero, 2014

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

IRENA (2016). Perspectivas de energías renovables: República Dominicana. REmap 2030.

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.

Masera, O., (2009). La Bioenergía en México. Un catalizador para el desarrollo sustentable. Red Mexicana de Bioenergía, México, 2009.

Ministerio de Energía y Minas – MEM (2017). Producción Pecuaria, 2002-2016. República Dominicana

Organización Panamericana de la Salud (OPS) (2003). Evaluación regional de los servicios de manejo de residuos sólidos municipales. Informe analítico de República Dominicana.

Plan Operativo Anual – POA (2017). Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales. Santo Domingo, República Dominicana.

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

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

REN21, 2017. Renewable Energy Tenders and Community [Em]power[ment]: Latin America and the Caribbean (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.

The Global Methane Initiative – TGMI (2011). Resource Assessment for Livestock and Agro-Industrial Wastes – Dominican Republic. Eastern Research Group, Inc., March 2011, República Dominicana.

Universidad Nacional Agraria La Molina – UNALM (2017). Reporte intermedio del Estudio de Biomasa. Estudio para la Producción de Briquetas a partir de la Biomasa disponible en la región Fronteriza de Republica Dominicana.

IEA. 2012a. Renewables Information - IEA Statistics. International Energy Agency, Paris Cedex 15, France.

IEA. 2012b. World Energy Statistics and Balances (database). International Energy Agency, DOI: 10.1787/data-00510-en (Accessed on 09 October 2012).