



ESTUDIOS DEL CAMBIO CLIMÁTICO EN AMÉRICA LATINA

Valoración económica de los cobeneficios del aprovechamiento energético de los residuos agrícolas en el Ecuador

Marco Calderón Loor
Fernando Andrade
Lorena Lizarzaburu
Mauricio Masache



NACIONES UNIDAS

CEPAL



UNION EUROPEA



Valoración económica de los cobeneficios del aprovechamiento energético de los residuos agrícolas en el Ecuador

Marco Calderón Loor
Fernando Andrade
Lorena Lizarzaburu
Mauricio Masache



Este documento fue preparado por Marco Calderón Loor, Fernando Andrade, Lorena Lizarzaburu y Mauricio Masache, Consultores de la Unidad de Cambio Climático de la División de Desarrollo Sostenible y Asentamientos Humanos de la Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL), en el marco de las actividades del programa EUROCLIMA (CEC/14/001), y contó con el financiamiento de la Unión Europea.

Ni la Unión Europea ni ninguna persona que actúe en su nombre es responsable del uso que pueda hacerse de la información contenida en esta publicación. Los puntos de vista expresados en este estudio son de los autores y no reflejan necesariamente los puntos de vista de la Unión Europea.

Las opiniones expresadas en este documento, que no ha sido sometido a revisión editorial, son de exclusiva responsabilidad de los autores y pueden no coincidir con las de la Organización.

Publicación de las Naciones Unidas

LC/TS.2017/52

Distribución: Limitada

Copyright © Naciones Unidas, junio de 2017. Todos los derechos reservados

Impreso en Naciones Unidas, Santiago

S.17-00556

La autorización para reproducir total o parcialmente esta obra debe solicitarse a la Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL), División de Publicaciones y Servicios Web, publicaciones@cepal.org. Los Estados Miembros de las Naciones Unidas y sus instituciones gubernamentales pueden reproducir esta obra sin autorización previa. Solo se les solicita que mencionen la fuente e informen a la CEPAL de tal reproducción.

Índice

Glosario	5
Resumen	7
Introducción	11
I. Estado del arte	13
A. Emisión de GEI en el sector agrícola	13
B. Tecnologías disponibles en el mundo para el aprovechamiento energético de los residuos agrícolas	15
C. Experiencias en Ecuador	17
II. Selección de cultivos, área de estudio, tecnologías de aprovechamiento y cobeneficios	19
A. Elección de cultivos y zonas de estudio	19
B. Elección de tecnologías de reaprovechamiento energético según los cultivos seleccionados	21
1. Caracterización de la tecnología	22
C. Tipología de pequeños, medianos y grandes productores, índices de rendimiento y definición de cobeneficios	22
1. Tipología de productores agrícolas en Ecuador	22
2. Características de rendimiento de los cultivos agrícolas elegidos	23
D. Definición de los cobeneficios del aprovechamiento energético de los residuos agrícolas	24
E. Descripción de la metodología utilizada en la valoración económica de cobeneficios y el cálculo del beneficio directo	26
1. Objetivos de la valoración económica	26
2. Valor económico total	26
3. Valoración económica de los cobeneficios del aprovechamiento energético de los residuos agrícolas en Ecuador	27
III. Definición del modelo, análisis de resultados y factibilidad	29
IV. Barreras de implementación de la tecnología	35
A. Barreras relacionadas a la capacidad y experiencia	36
B. Barreras relacionadas a la articulación/coordiación de actores	36
C. Barreras relacionadas al mercado	36

V. Conclusiones	37
VI. Recomendaciones	39
Bibliografía	41
Cuadros	
Cuadro 1	Variables utilizadas para la modelización económica 9
Cuadro 2	Variables de salida del modelo financiero. 9
Cuadro 3	Características físicas de la biomasa residual agrícola..... 15
Cuadro 4	Resumen de la cantidad de energía anual producida los residuos generados para diez cultivos agrícolas representativos ecuatorianos 15
Cuadro 5	Experiencias de aprovechamiento energético de residuos 17
Cuadro 6	Variables analizadas para la elección de los cultivos agrícolas a estudiar 20
Cuadro 7	Resumen de las variables elegidas para la selección de los cultivos agrícolas..... 20
Cuadro 8	Tecnologías de aplicación por tipo de cultivo 21
Cuadro 9	Rendimiento de producción y de generación de residuos por hectárea y cultivo para el 2014..... 23
Cuadro 10	Producción agrícola y de residuos de los cultivos seleccionados para cada escenario a modelar en las provincias de Guayas y Los Ríos..... 24
Cuadro 11	Número de hogares por cada escenario de producción..... 24
Cuadro 12	Cobeneficios, indicadores y metodología definida para el aprovechamiento energético de los residuos agrícolas 25
Cuadro 13	Tipo de valor y beneficio del aprovechamiento energético de residuos agrícolas 27
Cuadro 14	Variables de entrada del modelo financiero 30
Cuadro 15	Potencial eléctrico anual de los cultivos seleccionados 31
Cuadro 16	Escenarios de evaluación para la modelación 31
Cuadro 17	Ejemplo de valoración para el escenario 1 32
Cuadro 18	Resultados de la modelación para el escenario 1 32
Cuadro 19	Resumen de resultados bajo condiciones iniciales 34
Cuadro 20	Barreras de implementación 35
Gráficos	
Gráfico 1	Capacidad instalada por escenario 9
Gráfico 2	Impacto por decenio en el rendimiento de cuatro cultivos agrícolas para diferentes regiones del mundo, 1960-2013..... 13
Gráfico 3	Cambio en el rendimiento del trigo, arroz y maíz para diferentes períodos de tiempo en el futuro 14
Gráfico 4	Toneladas de CO ₂ evitadas 33
Gráfico 5	Rango de incentivos por emisiones evitadas 33
Diagramas	
Diagrama 1	Opciones de mitigación de GEI por parte del sector agrícola 15
Diagrama 2	Procesos tecnológicos que se utilizan para la obtención de energía a partir de la biomasa 17
Diagrama 3	Diagrama esquemático de generación con turbina de vapor 22
Diagrama 4	Explicación del cálculo del valor económico total..... 27

Glosario

AEA	Alianza en Energía y Ambiente
CC	Costos de combustible
CEPAL	Comisión Económica para América Latina y el Caribe
CH ₄	Metano
CO ₂	Dióxido de carbono
EG	Electricidad generada
GEI	Gases de efecto invernadero
IG	Incentivo de gobierno
IICA	Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura
In	Inversión inicial
INER	Instituto Nacional de Eficiencia Energética y Energías Renovables
INP	Instituto Nacional de Preinversión
IR	Impuesto a la renta
LCOE	Costo de generación de electricidad
MAGAP	Ministerio de Agricultura, Acuicultura y Pesca
MCPEC	Ministerio Coordinador de Producción, Empleo y Competitividad
MEER	Ministerio de Electricidad y Energía Renovable
N ₂ O	Óxido nitroso
O&M	Gastos operativos
t	Periodo de evaluación (tiempo)
TIR	Tasa interna de retorno
TD	Tasa de descuento

VAN	Valor actual neto
VE	Valores de existencia
VET	Valor económico total
VL	Valores de legado
VO	Valor de opción
VUD	Valores de uso directo
VUI	Valores de uso indirecto
WACC	Promedio ponderado del costo de capital

Resumen

Las actividades agrícolas son particularmente vulnerables a los efectos del cambio climático pero a su vez, son responsables de aproximadamente el 11% de las emisiones totales de gases de efecto invernadero (GEI) de origen antropogénico a nivel global. Una de las fuentes más importantes es la descomposición de los residuos orgánicos de los cultivos. Aunque, pueden ser aprovechados para la generación de energía eléctrica a través del uso de diferentes tecnologías.

Aunque existen diversas experiencias de aprovechamiento de residuos en Ecuador, no se han realizado estudios de valoración económica de sus beneficios y cobeneficios. El presente estudio muestra por primera vez un estudio de valoración económica de cobeneficios para el aprovechamiento energético de los residuos de cuatro cultivos agrícolas para tres grandes escenarios de tenencia de tierra (pequeños, medianos y grandes productores).

La selección de cultivos fue: dos de subsistencia y dos de exportación, se realizó en base al poder calorífico inferior de los residuos, tipo de residuo, superficie de cultivo, residuos anuales producidos, energía bruta producida al año, tendencia histórica de producción, vulnerabilidad al cambio climático y tipo de consumo. Se seleccionaron los cultivos de palma africana, banano, arroz y caña de azúcar (los dos primeros para exportación y los dos últimos de subsistencia). Guayas y Los Ríos fueron seleccionadas como las áreas de estudio al ser las zonas prioritarias de producción de estos cultivos a nivel nacional. La tecnología que permite obtener la máxima cantidad de energía a partir de los residuos de los cultivos seleccionados es la de generación eléctrica con turbina de vapor.

A partir de la selección realizada –de cultivos, zonas y tecnología– se determinaron algunos parámetros básicos que fueron utilizados en la modelización económica. También, se establecieron las superficies de tierra para cada escenario de producción, los rendimientos y de residuos para cada cultivo (en cada provincia); y, el número de hogares en cada uno de los escenarios planteados.

Como la valoración de cobeneficios es el eje central del presente estudio se realizó una identificación de aquellos beneficios secundarios derivados del aprovechamiento energético identificando cuatro: generación eléctrica, fortalecimiento de capacidades, mejora en la calidad de vida y mitigación del cambio climático. Cada uno posee un indicador asociado que ha sido valorado de manera cuantitativa, excepto el fortalecimiento de capacidades (es cualitativo).

El modelo financiero utilizado para la valoración económica de los cobeneficios busca determinar la factibilidad de los proyectos de aprovechamiento energético a través de la tasa interna de retorno, los incentivos por toneladas de CO₂ evitadas y el costo de residuo generado por tonelada. Adicionalmente, la modelación permitió la obtención de los valores mínimos necesarios para la factibilidad de los proyectos. El modelo utiliza una serie de variables económicas, tecnológicas y sociales que permiten asegurar su transparencia, robustez y eficacia. El cuadro 1 presenta un resumen de las variables utilizadas.

El gráfico 1 presenta la capacidad instalada para cada escenario de modelización. Aquellos escenarios con una capacidad instalada superior a los 100 kW (representados por la línea naranja en la gráfica) están en capacidad de inyectar energía al sistema interconectado. Por otro lado, los escenarios con capacidad instalada menor a este valor se consideran de autoabastecimiento (i.e. utilizan la energía eléctrica para el consumo propio).

El modelo fue aplicado a 18 diferentes escenarios de modelación, uno por cultivo, zona y tipo de productor. El resultado arrojó un conjunto de 10 variables de salida que son utilizadas para el análisis (véase el cuadro 2).

El análisis de las variables de salida del modelo financiero para cada uno de los escenarios propuestos muestra que de implementarse los proyectos con las condiciones iniciales¹ todos presentarían un VAN positivo, lo cual implica que cualquier escenario es factible a implementación. Si bien, los valores son atractivos, se contrastan con los de la tasa interna de retorno que, en ningún caso, sobrepasan el valor límite establecido (20%). Para este estudio la tasa mínima aceptable de rendimiento (TMAR) fue considerada como la suma de la tasa de interés activa del Banco Central de Ecuador (BCE) vigente a mayo de 2016 (10,09 %); y, la tasa pasiva referencial de una inversión a largo plazo (8,05 %). Así, el TMAR es igual a 18,14 % (pero definido con el 20% para todos los escenarios), por lo que para que un proyecto sea viable la TIR debe ser mayor o igual a éste (Banco Central del Ecuador, 2016). A nivel de cultivos, el de arroz es el que presenta mejores condiciones a pequeña, mediana y gran escala en ambas provincias (TIR cercana al 20%).

Como paso final, se determinó el monto del incentivo que debería existir en la reducción de para alcanzar una Tasa Interna de Retorno (TIR) del 20%. Los resultados reflejan que este incentivo debería variar de 8,95 dólares en el caso del arroz para pequeños productores hasta 61,32 dólares en el caso de la caña de azúcar para los grandes productores, ambos casos en la provincia del Guayas.

Aunque la reducción de emisiones de CO₂ se produce en todos los escenarios, las menores son para la palma africana, caña de azúcar y el banano cercanas a las 2, 1,5 y 800 miles de tCO₂ al año respectivamente.

Para ofrecer una interpretación de los resultados, se analizaron las barreras de implementación para los proyectos de aprovechamiento bioenergético actuales, fueron halladas tres tipos principales: capacidad y experiencia, articulación de actores y mercado. La primera está relacionada a la falta de conocimiento y de capacidades técnicas por parte de los gobiernos locales, el central y los actores privados, lo que dificulta la reducción de la incertidumbre acerca de los resultados del proyecto y el aumento de la confianza para los productores.

Por su parte, la articulación de actores, se relaciona con la desconexión de los actores públicos y privados y la falta de interés en el trabajo colaborativo. Adicionalmente, la falta de políticas públicas y planes específicos de implementación generan retrasos y obstáculos al conectar a los involucrados en el problema. Finalmente, las barreras relacionadas al mercado –presencia de subsidios, falta de proveedores y especulación en los precios de los residuos– generan inestabilidad y afectan la rentabilidad y sostenibilidad de proyectos de aprovechamiento energético (Montenegro, 2013). La generación de políticas públicas que promuevan el uso de este tipo de residuos para el aprovechamiento energético además de ser beneficiosa para el ambiente, podría crear una oportunidad de negocio atractiva para los agricultores.

¹ Condiciones iniciales de modelación: el costo por tonelada de residuo es cero, el monto de inversión inicial es de 1.859 dólares y no se cuenta con algún tipo de incentivo por emisiones evitadas.

Cuadro 1
Variables utilizadas para la modelización económica

Variable	Unidad	Variable	Unidad
De precio		Término	
Precio mayorista	\$/kWh	Construcción	años
Tarifa	\$/kWh	Tiempo de vida	años
Factor de emisión	-	Construcción	años
Tecnológicas	-	y tiempo de vida	
Generación anual	MWh		
Factor de planta	%	Social	
Capacidad instalada	W	Número de personas por vivienda	-
Financieros		Umbral mínimo de electrificación rural/vivienda/mes	kWh
Costo de instalación	\$/Watt	Umbral mínimo de electrificación rural/vivienda	kWh/años
Capital total de inversión	\$	Demanda total	W
Participación de la deuda	%	Viviendas beneficiarias	
Total de deuda	\$	Pequeño	W
Tasa de interés	%	Mediano	W
Tiempo de la deuda	años	Grande	W
Participación en el capital	%		
Total de participación	\$		
Operación y mantenimiento	\$/kWh		
Costo del combustible	\$/kWh		
Tasa de impuesto	%		
Tasa de descuento	%		

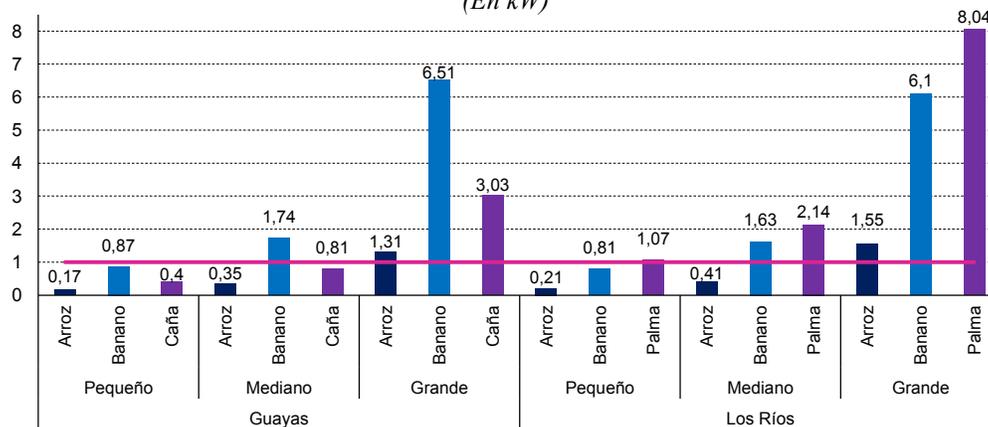
Fuente: Elaboración de los autores con base en datos del INEC, (2012).

Cuadro 2
Variables de salida del modelo financiero

Capacidad instalada	Precio del residuo
Generación eléctrica	Incentivo
Toneladas de CO ₂ e evitadas	TIR
Utilidad por venta de energía	VAN
Capital de inversión	LCOE

Fuente: Elaboración de los autores con base en datos del INEC, (2012).

Gráfico 1
Capacidad instalada por escenario
(En kW)



Fuente: Elaboración de los autores con base en datos del INEC, (2012).

Introducción

En las últimas décadas, el cambio climático es inequívoco y sin precedentes (IPCC, 2014b). Este evento tiene una estrecha relación con el incremento de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) post revolución industrial y pone en riesgo los sistemas naturales y humanos. Sin embargo, éstos pueden disminuirse por medio de planes de mitigación de emisiones y adaptación a los nuevos escenarios climáticos.

Diferentes esfuerzos regionales, nacionales y subnacionales se vienen realizando con el objetivo de aportar a la disminución de emisiones de GEI y a sus riesgos asociados. A través del Programa EUROCLIMA, la Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL) pretende facilitar la integración de medidas de mitigación y adaptación a diferentes escalas en América Latina. El programa prioriza aquellas acciones relacionadas a sectores de prioridad nacional y que generen beneficios adicionales.

En Ecuador, la agricultura es uno de los sectores que más aporta al PIB de la economía nacional (aproximadamente al 8,5% de los últimos 11 años) (El Agro, 2014), acogiendo al 28% de la fuerza laboral (CIA, 2015) y representando alrededor del 28% de las exportaciones del país (BCE, 2015). Sin embargo, los cambios en el régimen de precipitación y de temperatura (media, mínima y máxima) influirían en la aptitud agrícola de tierras cultivables reduciendo así su productividad (MAE, 2012). Lo que no solo afectaría la economía nacional sino también amenazaría la seguridad alimentaria e incrementaría el número de personas con riesgo de pasar hambre (IPCC, 2014b).

Por otro lado, a nivel nacional, la agricultura es uno de los sectores que más emisiones de GEI aporta a la atmósfera (MAE, 2011). Se calcula que el aporte de la agricultura a la emisión de GEI en Ecuador es cercano a las 160 millones de tCO₂e al año, correspondiente a casi el 28% de las emisiones de GEI (MAE, 2014a). Una parte importante son generadas por la quema y/o descomposición de los residuos agrícolas.

Frente a este escenario se presentan oportunidades para el aprovechamiento energético de residuos agrícolas. Primero, la reducción de las emisiones de GEI causadas por la quema o descomposición de residuos agrícolas y segundo, la generación de energía renovable (disminuyendo la dependencia de combustibles fósiles). Adicionalmente, se tiene el potencial de generar beneficios económicos que compensen la baja en la productividad del sector agrícola (Trávez, 2011).

Mediante este estudio, para la valoración económica de los cobeneficios del aprovechamiento energético de residuos agrícolas en Ecuador, se pretende generar información que pueda ser utilizada como insumo por los tomadores de decisiones y encargados de diseñar los planes y políticas para enfrentar el cambio climático en la agricultura ecuatoriana.

Para fines de este estudio, se consideran como cultivos de subsistencia al producto de la actividad agrícola que permite abastecer las necesidades básicas del campesino y las de su familia a través de su consumo directo o comercialización. Así mismo y como su nombre lo indica, se consideran como cultivos de exportación a aquellos que tienen como principal objetivo el de ser comercializados en mercados externos. Se considera como cobeneficio a los aprovechamientos de las políticas de mitigación implementadas, reconociendo que la mayoría poseen beneficios secundarios que van más allá de la reducción de emisiones de GEI (directos), y que son al menos igual de importantes (por ejemplo: beneficios relacionados al desarrollo, sostenibilidad y equidad) (Santucci L, Puhl I, Maqsood A, Enayetullah I, & Agyemang-Bonsu W, 2015).

Este documento está organizado de la siguiente manera: primero, se ofrece un repaso de los antecedentes que justifican la elaboración del estudio de valoración económica sobre los cobeneficios del aprovechamiento energético para los residuos agrícolas en Ecuador. El capítulo I, contiene la revisión del estado de arte sobre los temas relevantes al desarrollo de los objetivos claves, que incluyen la información actualizada sobre la emisión de GEI en el sector agrícola, la tecnología disponible para aprovechamiento energético de residuos agrícolas en el mundo y las experiencias anteriores en Ecuador. El capítulo dos desarrolla en detalle la metodología; para luego definir los cobeneficios, tipología de los productores e índices de rendimiento. En el capítulo tres se define el modelo y se analizan los resultados obtenidos para cada uno de los escenarios definidos. A continuación, el capítulo cuatro contiene un análisis de las barreras presentes en el panorama actual de implementación. Finalmente, se engloban las recomendaciones y conclusiones pertinentes.

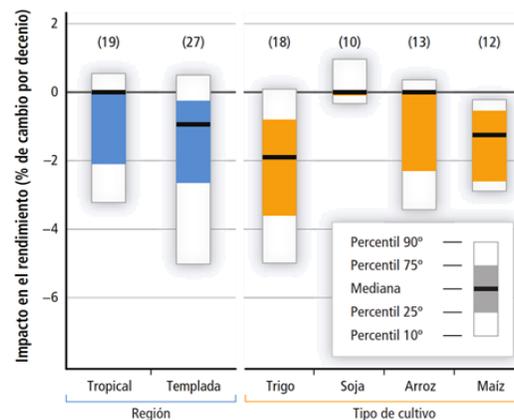
I. Estado del arte

A. Emisión de GEI en el sector agrícola

La actividad agrícola es una de las actividades humanas más importantes, se extiende en un área equivalente al 26% de la superficie del Ecuador (P. Smith et al., 2008). Esta actividad está limitada por las condiciones climáticas locales y los fenómenos climáticos globales, que influyen en el rendimiento de cultivos y en la aptitud agrícola de las zonas donde se desarrollan (Anwar, Li Liu, Macadam, & Kelly, 2013).

De acuerdo al quinto informe de evaluación del IPCC (2014b) los efectos del cambio climático ya se han manifestado sobre diferentes sectores. Entre estos, está la agricultura que ha experimentado impactos negativos en los rendimientos de los principales cultivos a nivel global (trigo, soja, arroz y maíz). El gráfico 2 resume el impacto por decenio en el rendimiento de los cultivos mencionados para zonas templadas y tropicales. Como se puede observar las primeras han sufrido mayor impacto en comparación con las segundas. Por otro lado, el cultivo que mayor impacto negativo en su rendimiento es el trigo con una reducción aproximada del 2% (mediana), seguido del maíz, cercano al 1%. La mayor parte de sitios analizados no presentan mayor cambio en el rendimiento para los cultivos de soja y arroz.

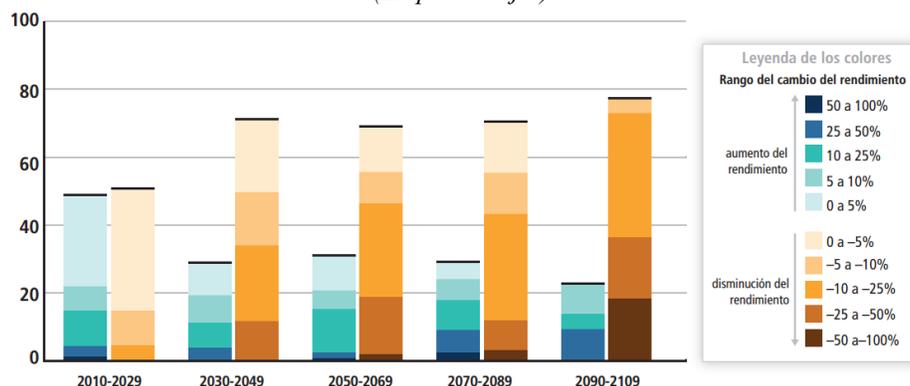
Gráfico 2
Impacto por decenio en el rendimiento de cuatro cultivos agrícolas para diferentes regiones del mundo, 1960-2013



Fuente: IPCC, (2014).

Nota: Los números en paréntesis significan el número de datos analizados.

Gráfico 3
Cambio en el rendimiento del trigo, arroz y maíz para diferentes períodos de tiempo en el futuro
(En porcentajes)



Fuente: IPCC, (2014).

Los impactos sufridos actualmente en el sector agrícola se verían incrementados en el futuro de acuerdo a los escenarios elaborados por el IPCC. Aproximadamente el 70% del porcentaje total de escenarios futuros predicen una disminución en el rendimiento del maíz, trigo y arroz para el período 2050-2069, siendo la disminución de este cambio de entre 10-20%. Para los períodos subsiguientes hasta el año 2100 estas tendencias se conservarían y las magnitudes de los cambios se elevarían (véase el gráfico 3).

A nivel global, la actividad agrícola es altamente vulnerable a los cambios en el clima y al mismo tiempo es una de las actividades que más contribuye a exacerbar el calentamiento global. Gases como el dióxido de carbono (CO₂), metano (CH₄) y el óxido nitroso (N₂O) son liberados en grandes cantidades a la atmósfera, contribuyendo con alrededor del 10-12% de las emisiones totales causadas por la actividad antropogénica (Cameron, 2014). Para Ecuador, el promedio de emisiones por parte de los suelos agrícolas es de casi de 160 millones de tCO₂e al año (MAE, 2014a).

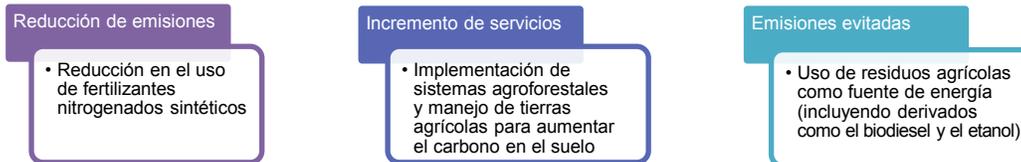
El origen de las emisiones difiere de acuerdo al tipo de GEI pero pueden clasificarse en:

- CO₂: liberado a la atmósfera mayoritariamente por la descomposición y quema de la materia vegetal inerte y, por la materia orgánica del suelo.
- CH₄: producido cuando la materia orgánica se descompone en ausencia de oxígeno. Su principal fuente en el sector agrícola proviene de los cultivos de arroz en condiciones de inundación (Mosier et al., 1998).
- N₂O: generado principalmente por la fertilización artificial de la tierra. Adicionalmente, su emisión es potenciada cuando los suelos contienen exceso de nitrógeno, especialmente bajo condiciones húmedas (K. Smith & Conen, 2004).

A pesar de que las emisiones de GEI agrícolas conforman un importante porcentaje de las emisiones globales totales y con casi el 28% de las emisiones totales de GEI en Ecuador (MAE, 2014b), existen diversas opciones de mitigación. P. Smith et al. (2008) agrupan estas opciones en tres grupos: reducción de emisiones, incremento de los reservorios de GEI y emisiones evitadas (véase el diagrama 1).

En el diagrama 3 se puede observar que una manera de evitar emisiones de GEI provenientes de la agricultura es a través del uso y manejo de los residuos agrícolas como fuente de energía. De acuerdo a datos de la FAO (2015) aproximadamente el 2% del total de emisiones de GEI del sector agrícola a nivel mundial provienen de los residuos de los cultivos, éstos se producen en grandes cantidades desde la siembra, hasta después de su procesamiento (MAE, 2014a). También, son considerados como biomasa (al provenir de material vegetal), por lo tanto, pueden ser aprovechables para la generación de energía renovable (ESIN, 2014). Específicamente, la biomasa residual es definida como todo material en estado sólido, líquido o gaseoso que no es aprovechado en la producción o el consumo humano (San Román, 1985). El cuadro 3 presenta los tipos de residuos más comunes junto con sus características físicas.

Diagrama 1 Opciones de mitigación de GEI por parte del sector agrícola



Fuente: Modificado de P. Smith et al., (2008).

Cuadro 3 Características físicas de la biomasa residual agrícola

Fuente generadora de biomasa	Tipo de residuo	Características físicas
Residuos agrícolas	Cáscara y pulpa de frutas vegetales	Sólido, muy húmedo
	Cáscaras y polvo de granos secos	Polvo, humedad menor al 25%
	Tallos, hojas, pastura, cáscaras, maleza	Sólido, humedad mayor al 25%

Fuente: Modificado de ESIN, (2014).

En Ecuador se han realizado pocos estudios para conocer el potencial energético de los residuos agrícolas de los cultivos más representativos del país. Uno de estos es el Atlas Bioenergético de Ecuador (ESIN, 2014) realizado por el Ministerio de Electricidad y Energía Renovable (MEER) en junto con el Ministerio Coordinador de Producción, Empleo y Competitividad (MCPEC) y el Instituto Nacional de Preinversión (INP); el estudio determinó el potencial bioenergético de todos los cantones de Ecuador de acuerdo a la cantidad de residuos generados por año de un total de 10 cultivos nacionales (de exportación y consumo interno). Adicionalmente, se identificaron las tecnologías de aprovechamiento más viables para maximizar la producción de energía anual. El cuadro 4 presenta un resumen junto a la cantidad de energía producida al año a través del aprovechamiento de los residuos agrícolas.

Es importante mencionar que los residuos agrícolas para el aprovechamiento energético son aquellos residuos sobrantes que quedan luego de abonar la tierra. Existen varias tecnologías para su aprovechamiento energético y que dependen de las características del tipo de biomasa residual, las cuáles se detallan a continuación.

Cuadro 4 Resumen de la cantidad de energía anual producida los residuos generados para diez cultivos agrícolas representativos ecuatorianos

Cultivo	Residuos (en t/año)	Energía bruta (en TJ/año)	Cultivo	Residuos (en t/año)	Energía bruta (en TJ/año)
Palma africana	6 872 469,00	87 835,47	Palmito	478 751,40	6 338,96
Banano	4 926 096,00	62 231,77	Maíz duro	434 921,30	5 423,32
Arroz	2 106 696,00	28 356,98	Plátano	372 576,00	4 703,92
Caña de azúcar	793 283,40	15 746,26	Café	104 048,30	1 004,61
Cacao	2 015 353,00	13 631,45	Piña	124 699,10	1 130,11

Fuente: ESIN, (2014).

B. Tecnologías disponibles en el mundo para el aprovechamiento energético de los residuos agrícolas

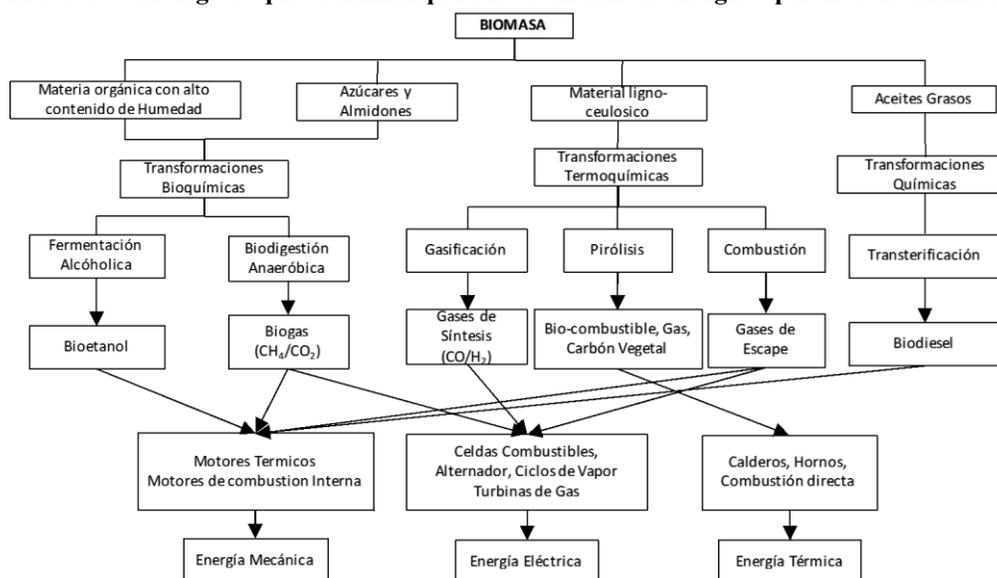
Los procesos de aprovechamiento energético de biomasa residual no son nuevos. El tipo de tecnología a utilizarse se determina en base de las propiedades físico-químicas de la biomasa (ESIN, 2014). De acuerdo a su origen y contenido se clasifican de la siguiente manera (ESIN, 2014; MAE, 2014a; San Román, 1985):

- **Materia orgánica con alto contenido de humedad:** producida por desechos agrícolas y pecuarios. Los segundos pueden provenir de desechos del animal muerto, los cuales se obtienen de mataderos, o desechos del animal vivo, mismos que se obtienen de los establos y encierros estiércol. El más común es el estiércol animal, el cual tiene un alto contenido de humedad y es un material fermentable que contiene elevados niveles de nutrientes inorgánicos como el nitrógeno y el fósforo. Los residuos agrícolas con alto contenido de humedad entran en este grupo.
- **Biomasa con alto contenido de azúcares y almidones:** aquellos que provienen de la cosecha y pos-cosecha de frutas, hortalizas y otros cultivos de ciclo corto con un alto contenido de azúcares como la caña de azúcar, y almidones como la papa y la yuca.
- **Biomasa con alto contenido de lignocelulosa:** proviene de desechos agrícolas y madereros como hojas, ramas y troncos. La celulosa, la hemicelulosa y la lignina son carbohidratos que conforman la pared celular de las plantas formando la porción fibrosa de la misma. La celulosa es el principal polímero estructural de la pared celular de la planta y su fibra es poco sensible a la degradación. La lignina es el componente que fortalece la pared celular de la planta, los troncos y las ramas de árboles maderables mismos que tienen un gran contenido de lignina (Pasangulapati et al., 2012).
- **Biomasa con alto contenido de ácidos grasos:** proviene de residuos agrícolas oleaginosos, es decir, son residuos de los cultivos de los que a partir de su fruto o su semilla se puede obtener aceite, por ejemplo: la palma africana, jatrofa, coco, soja, entre otros.

El diagrama 2 sintetiza los procesos tecnológicos que se utilizan para la obtención de energía a partir de la biomasa, los cuales se dividen en 3 grupos principales:

- **Tecnologías de transformación bioquímicas:** se utilizan para biomasa residual con alto contenido de humedad como los desechos animales, los mismos que son degradados por bacterias anaerobias (biodigestión anaerobia) para producir gas metano. También se puede utilizar biomasa de alto contenido en azúcares y almidones, por medio de la fermentación alcohólica realizada por levaduras y otros microorganismos (Bessou, Ferchaud, Gabrielle, & Mary, 2011).
- **Tecnologías de transformación termoquímica:** se utilizan para biomasa residual de alto contenido en lignocelulosa, pueden tomar cuatro rutas: combustión, pirolisis, gasificación y cogeneración.
 - **Combustión:** quema directa de la biomasa liberando energía térmica, que puede ser aprovechada directamente para cocción de alimentos, hornos y procesos de secado. Adicionalmente la energía producida de este proceso puede ser usada en la generación eléctrica, empleándose como combustible de calderos y turbinas de vapor (Basu, 2013).
 - **Pirolisis:** calentamiento de la biomasa en total ausencia de oxígeno, a partir del cual se produce combustible líquido, conocido como bio-combustible o bio-oil, gas y carbón vegetal (Basu, 2013).
 - **Gasificación:** proceso en el cual la biomasa es transformada por completo en gas combustible por medio de un agente gasificante como el aire, vapor de agua, hidrogeno u oxígeno. Puede ser usado en turbinas para generación eléctrica, en motores de combustión interna, y en calderos de forma similar al uso del gas natural (ESIN, 2014).
 - **Cogeneración:** obtención paralela de dos tipos de energía, como la térmica y eléctrica, en un sistema (MEER, 2015).
- **Transformaciones químicas (transesterificación):** tecnología que se utiliza para procesar la biomasa con alto contenido de ácidos grasos (aceites). Es una "forma sencilla de tratar que los aceites asemejen las características un diesel-oil" (ESIN, 2014). Es un proceso químico en el cual los aceites se combinan con alcohol para obtener biodiesel y glicerina; los cuales pueden ser usados directamente como combustibles en motores, o combinados con los combustibles tradicionales (ESIN, 2014).

Diagrama 2
Procesos tecnológicos que se utilizan para la obtención de energía a partir de la biomasa



Fuente: Modificado de Frías San Román, (1985).

C. Experiencias en Ecuador

Ecuador ha tomado parte en las experiencias acerca del aprovechamiento energético de residuos agrícolas con distintos proyectos; mismos que se han fomentado a través de instituciones públicas y privadas. Además, muchas de estas experiencias han tenido apoyo técnico o financiero de organizaciones internacionales, los proyectos desarrollados se presentan en el cuadro 5.

Cuadro 5
Experiencias de aprovechamiento energético de residuos

Nombre	Tecnología	Lugar	Materia prima	Cantidad	Producto	Cantidad	Inversión (en dólares)
Generación de aire caliente por combustión de residuos agrícolas	Combustión	Cumbayá, Pichincha	Residuos de palma africana	25 kg/h	Aire caliente	400 m ³ /h	5000 (año 2008)
Planta La Fabril S.A., Transesterificación de aceite de Palma en biodiesel	Transform. química	Montecristi, Manabí	Aceite de palma, soya virgen y aceites recuperados	60 000 t/año	Biodiesel y glicerina	58 000 t/año	15 millones (año 2005)
Latinoamericana de Jugos S.A., Planta semi-industrial de digestión anaerobia	Biodigestión anaerobia	Sangolquí, Pichincha	Residuos de frutas como la naranjilla y la piña	100-1 000 kg/día	Biol y biogás	100-1 000 kg/día de biol y 5-50 m ³ /día de biogás con 60% de CH ₄	450 000 (año 2013)
Proyecto de Recursos Sustentables para el Etanol (RESETA)	Biorefinería	Nayón, Pichincha	Biomasa residual tales como la tagua y el bagazo de caña	ND	Biodiesel, biogás, bioetanol y biofertilizante	60 000 litros/año bioetanol	1.8 millones (año 2012)
Planta piloto de gasificación y planta piloto de pirolisis en la Concordia	Pirólisis	Concordia, Santo Domingo de los Tsáchilas	Residuos de la palma africana	ND	Briquetas de carbón vegetal (pellets)	ND	150 000 (año 2009)
Planta de Cogeneración de la Sociedad Agrícola e Industrial San Carlos S.A	Cogeneración	Marcelino Maridueñas, Guayas	Bagazo de caña	260 000 t/año	Energía eléctrica y térmica	50 MW	46 millones

Fuente: Elaboración de los autores con base en datos del MAE, (2014).

II. Selección de cultivos, área de estudio, tecnologías de aprovechamiento y cobeneficios

Los objetivos del estudio a desarrollarse en ésta sección son: identificar los cultivos y zonas de estudio (dos cultivos de exportación y dos cultivos de subsistencia); definir la tecnología de aprovechamiento de residuos según los cultivos elegidos; y, describir la metodología a utilizar en la valoración económica de cobeneficios y el cálculo del beneficio directo en términos de reducción de emisiones de carbono.

A. Elección de cultivos y zonas de estudio

En consonancia con los objetivos, el primer paso para la valoración económica es identificar cuáles son los cultivos que permiten maximizar la generación de energía y por tanto, los beneficios y cobeneficios asociados a su aprovechamiento. Por tal motivo, la variable más importante para la elección de los cultivos fue la de la producción de energía bruta anual, que depende directamente de la superficie cultivada, los residuos generados y el poder calorífico inferior de los cultivos. Complementariamente, un total de seis variables adicionales fueron analizadas con el fin de poner en contexto la situación actual y futura de los cultivos elegidos. Adicionalmente, se determinaron las provincias en las que la producción de los cultivos elegidos es mayor. Las variables analizadas se muestran en el cuadro 6.

De acuerdo a la cantidad de energía bruta anual, superficie cultivada y tipo de residuos generados por cada cultivo agrícola en Ecuador se seleccionaron cuatro: la palma africana, banano, arroz y caña de azúcar, los dos primeros considerados como cultivos de exportación y los dos últimos de subsistencia. El cuadro 7 resume la información analizada para cada uno de los cultivos agrícolas ecuatorianos. No se consideraron la piña, palmito y plátano por tener un aporte marginal de energía bruta anual.

Como se observa, el cultivo de palma africana es el que produce más cantidad de residuos anuales, seguido del banano, arroz, cacao y caña de azúcar. A pesar de que el cacao posee mayor cantidad de residuos anuales que la caña de azúcar, ésta tiene un mayor poder calorífico inferior: 19,85 y 15,53 MJ/kg respectivamente, por lo que la cantidad de energía bruta producida anualmente es menor que la generada a partir de los residuos del cacao. Adicionalmente, se consideró el tipo de residuo generado por cada cultivo agrícola, teniendo en todos los casos la posibilidad de trabajar con residuos de campo y procesamiento².

² El proceso llevado a cabo por el Atlas Bioenergético del Ecuador (2014) determina la viabilidad de trabajar con estos residuos. Sin embargo, de acuerdo al escenario de producción elegido se podrá elegir con qué tipo de residuo trabajar.

Cuadro 6
Variables analizadas para la elección de los cultivos agrícolas a estudiar

Variable	Definición/Detalles	Importancia	Fuente de información
Poder calorífico inferior	Cantidad total de calor desprendido en la combustión completa del combustible sin contar la parte correspondiente al calor latente del vapor de agua de la combustión, ya que no se produce cambio de fase, sino que se expulsa en forma de vapor (Petromercado, 2015).	Alta	Atlas Bioenergético del Ecuador (2014).
Tipo de residuo	Pueden ser residuos de campo o de procesamiento. Aunque un cultivo pueda presentar los dos tipos de residuos, se prefiere utilizar los residuos de procesamiento debido al menor costo asociado a la recolección y apilamiento de los residuos en un solo lugar. Por lo tanto, el aprovechamiento energético de residuos de campo podría no ser viable para pequeños agricultores.	Muy Alta	Atlas Bioenergético del Ecuador (2014).
Superficie de cultivo	Superficie total en la cual los cultivos se desarrollan.	Media	Atlas Bioenergético de Ecuador (2014).
Cantidad de residuos producidos al año	Directamente relacionada de la superficie y el tipo de cultivo.	Alta	Atlas Bioenergético de Ecuador (2014).
Energía bruta potencial producida al año	Calculado a partir del poder calorífico inferior de los cultivos, cantidad de residuos y superficie plantada.	Muy Alta	Atlas Bioenergético de Ecuador (2014).
Tendencias en la producción de cultivos	A través de datos de producción en los últimos años se determinó las tendencias de producción que podrían ser crecientes, decrecientes, variables o estables.	Media	Sistema de Información Nacional de Agricultura, Ganadería, Acuicultura y Pesca (2015).
Vulnerabilidad al cambio climático	Variable necesaria para conocer la situación futura de los cultivos debido a la influencia del cambio climático. Información no disponible para todos los cultivos.	Media	IPCC (2014), CIAT (2014) y Jiménez, Castro, Yépez, and Wittmer (2012)
Tipo de consumo	Diferenciación entre cultivos de subsistencia y de exportación.	NA	Atlas Bioenergético de Ecuador (2014).

Fuente: Elaboración de los autores con base en las fuentes citadas en el cuadro.

En términos de tendencias de producción se puede observar que únicamente la caña de azúcar y la palma africana poseen tendencias históricas crecientes en términos de producción, mientras que el banano y el arroz presentan tendencias estables y variables respectivamente. Un dato a tomar en cuenta es la vulnerabilidad de los cultivos considerados de subsistencia frente al cambio climático, tanto el arroz como la caña de azúcar podría sufrir un detrimento en su producción anual. Adicionalmente, las áreas en las que estos cultivos se desarrollan podrían perder su aptitud agrícola.

Cuadro 7
Resumen de las variables elegidas para la selección de los cultivos agrícolas

Cultivo	Poder calorífico inferior (en MJ/kg)	Residuos (t/año)	Superficie (en ha)	Energía bruta (TJ/año)	Tipo de residuos	Tendencia histórica producción (2000–2014)	Vulnerabilidad al CC (aparición o desaparición de áreas de cultivo)	Consumo	Zonas de producción prioritarias
Palma africana	16,40	6 872 469,3	240 333	87 835,5	Procesamiento	Creciente	-	Subsistencia/ exportación	Los Ríos, Esmeraldas, Sucumbíos
Banano	12,63	4 926 095,6	221 775	62 231,8	Procesamiento y campo	Estable	Nuevas áreas	Subsistencia/ exportación	Los Ríos, El Oro
Cacao	15,53	2 015 352,6	507 721	13 631,5	Procesamiento	Creciente	Nuevas áreas	Subsistencia/ Exportación	Guayas, Los Ríos, Manabí, Esmeraldas
Arroz	13,35	2 106 695,9	411 459	28 357,0	Procesamiento y campo	Variable	Menos áreas	Subsistencia	Guayas y Los Ríos
Caña de azúcar	19,85	793 283,4	106 926	15 746,3	Procesamiento y campo	Creciente	Menos áreas	Subsistencia/ exportación	Guayas
Maíz duro	12,55	434 921,3	361 347	5 423,3	Procesamiento y campo	Creciente	Menos áreas	Subsistencia/ exportación	Los Ríos, Guayas
Café	13,46	104 048,3	113 029	1 004,6	Procesamiento	Decreciente	Nuevas áreas	Subsistencia/ exportación	Manabí, Loja, Sucumbíos, Orellana

Fuente: Modificado de CIAT, (2014); ESIN, (2014); IPCC, (2014a) y MAGAP, (2015).

En la misma tabla se pueden observar las provincias en las que la producción de estos cultivos es mayor. Por tanto, se tiene que en la provincia de Los Ríos se cultiva palma africana y banano, mientras que los cultivos de arroz y caña de azúcar se cultivan mayoritariamente en la provincia del Guayas. Estas dos provincias serán las zonas de estudio utilizadas para los análisis posteriores.

B. Elección de tecnologías de reaprovechamiento energético según los cultivos seleccionados

La selección de las tecnologías adecuadas para el aprovechamiento energético de residuos agrícolas se realizó analizando el tipo de biomasa y utilizando el Atlas Bioenergético del Ecuador como fuente primaria de información (ESIN, 2014). Cada tipo de biomasa tiene propiedades específicas que determinan su rendimiento como combustible para la generación energética. Entre las propiedades más importantes están el contenido de humedad, contenido de ceniza, contenido de materia volátil, composición elemental, poder calorífico, densidad de masa (Basu, 2013).

Contenido de humedad: es la cantidad de agua que contiene el material expresado en porcentaje respecto a su peso.

Contenido de ceniza (o componente inorgánico): puede expresarse de la misma manera que el contenido de humedad. Sin embargo, la composición de ceniza afecta al comportamiento de la biomasa bajo altas temperaturas de combustión o gasificación.

Poder calorífico inferior: El valor de calentamiento está dado en energía (J) por kg de materia y es el indicador del límite de energía química del combustible en un ambiente estandarizado de acuerdo a la temperatura, el estado del agua y los productos de la combustión.

La biomasa siempre contiene agua, la cual es liberada como vapor después del calentamiento. Esto implica que el calor liberado es absorbido en el proceso de evaporación, por esta razón, el valor neto de calentamiento decrece cuando el contenido de humedad de la biomasa incrementa.

El cuadro 8 detalla los valores de las propiedades para cada cultivo y la tecnología adecuada para los mismos. Como se puede observar los cultivos seleccionados cumplen con las características requeridas para entrar dentro de un proceso de combustión y cogeneración, el contenido de humedad de la biomasa de los cultivos escogidos es menor al 50%, lo que indica un valor de calentamiento neto (poder calorífico) adecuado para los procesos. Además, la cogeneración produce dos tipos de energía como la térmica y eléctrica lo cual maximiza la utilización de la biomasa y su rendimiento.

Cuadro 8
Tecnologías de aplicación por tipo de cultivo

Cultivo	Poder calorífico inferior (en MJ/kg)	Contenido de Humedad (en porcentajes)	Contenido de ceniza (en porcentajes)	Tecnologías de aplicación	Fuente de información
Palma africana	16,40	13,15	12,00	Combustión, cogeneración	(ESIN, 2014; Basu, 2013)
Banano	12,63	11,91	0,78	Combustión, gasificación	(ESIN, 2014; Giraldo et al, Giraldo, Cuarán, García & Pardo, 2014)
Cáscara de arroz	13,35	9,00	19,00	Gasificación, combustión	(ESIN, 2014; Basu, 2013)
Caña de azúcar	19,85	49,50	1,56	Combustión, cogeneración	(ESIN, 2014; Torres, 2013; Espinosa, Machado, Reymond, Carrillo & Priadko, 1990)

Fuente: Elaboración de los autores con base en las fuentes citadas en el cuadro.

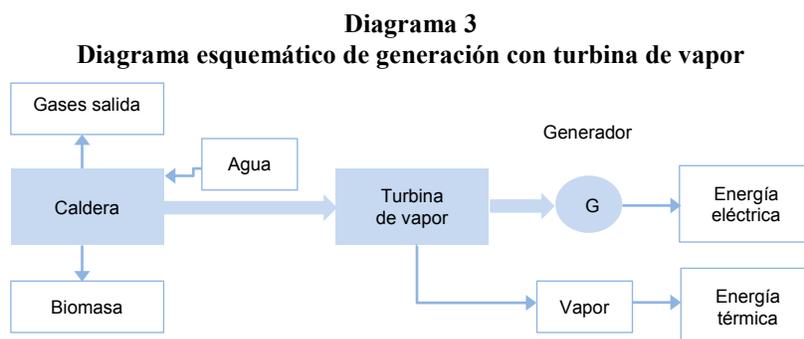
1. Caracterización de la tecnología

Al analizar los objetivos de los cobeneficios, se considera a la energía eléctrica como un índice medible y transformable a un valor monetario, capaz de transmitirse como beneficio directo. Bajo este contexto, serán determinadas las tecnologías escogidas de aplicación.

Tal como se mencionó, los procesos de combustión pueden ligarse a sistemas de generación eléctrica además, los sistemas de cogeneración pueden aprovechar la energía térmica residual derivada de los procesos industriales o de secado agrícola. Dentro de las tecnologías maduras que usan combustión de biomasa residual en su sistema para generación eléctrica se encuentran las turbinas de vapor, ésta tecnología (basada en ciclo termodinámico de Rankine) tiene la ventaja de poder usar cualquier tipo de combustible (sólido, líquido o gaseoso) para su proceso (incluida la biomasa), lo que lo hace un proceso adecuado para el uso de los diferentes cultivos (Obernberger & Thek, 2008; Agüero, Pisa, & Andina, 2011). Este método es ampliamente usado en el mundo, posicionándolo como un sistema robusto, *“más del 50% de la energía eléctrica generada en el mundo se produce diariamente con turbinas de vapor”* (García, 2012); convirtiéndolo en un proceso confiable y maduro, razones que justifican la elección de esta tecnología como la más adecuada para este estudio.

a) Generación eléctrica con turbina de vapor

El proceso aplicado en este sistema es el del ciclo de Rankine, donde la biomasa residual es el combustible de la caldera, transformándola en eje de intercambio de calor para producción de vapor a alta presión. Como se observa en el diagrama 3, el vapor es llevado a una turbina donde se expande, generando trabajo (energía mecánica) que hará girar un generador eléctrico y adicionalmente, producirá energía térmica a la salida de la turbina (Kapooria, Kumar, & Kasana, 2008).



Fuente: Adaptado de Universidad de Chile, (2002).

C. Tipología de pequeños, medianos y grandes productores, índices de rendimiento y definición de cobeneficios

Previo a la modelización y valoración económica del aprovechamiento energético de los cultivos agrícolas elegidos es necesario definir los escenarios para los cuáles se realizará el análisis. Adicionalmente, se presenta una descripción sobre los rendimientos agrícolas de los cultivos elegidos y de los cobeneficios a analizarse.

1. Tipología de productores agrícolas en Ecuador

El Ministerio de Agricultura, Ganadería, Acuacultura y Pesca (MAGAP) de Ecuador define la tipología de productores agrícolas basada en diferentes factores como: nivel de ingresos, lugar de residencia, tipo de mano de obra y superficie de la tierra que en posesión (Daza, 2015). A partir de este análisis se identificaron tres tipos de productores que serán utilizados para la valoración económica (INEC, 2012). En función de la superficie de tierra que poseen, la clasificación incluye:

- Pequeños productores: poseen tierras con superficies de entre 0,25 a 10 ha. La superficie promedio nacional es de 8 ha.
- Medianos productores: la superficie de tierra de estos productores está entre 10,1 y 50 ha, con una superficie promedio de 16 ha.
- Grandes productores: aquellos con tierras agrícolas con superficies mayores a las 50 ha, la superficie media a nivel nacional es de 60 ha.

2. Características de rendimiento de los cultivos agrícolas elegidos

Dado que los principales insumos para la generación eléctrica son los residuos agrícolas es necesario calcular los rendimientos por hectárea de cada cultivo y por tanto, la cantidad de residuos máxima que pueden generar. A partir de los datos del MAGAP (2015) se determinó la superficie cosechada y el rendimiento de cada cultivo; el cultivo de arroz es el que presenta la mayor superficie cosechada con casi 250 mil ha en Guayas. Por otro lado, el cultivo que mayor rendimiento de producción (mayor producción por hectárea) es la caña de azúcar con cerca de 82 ton/ha, seguido del banano, con 44 ton/ha en promedio.

Para determinar la cantidad de residuos generados se tomó como base el Atlas Bioenergético (2014). Una vez recolectados, los datos fueron utilizados para determinar el rendimiento de los residuos para cada uno de los cultivos en las dos provincias seleccionadas. El resultado muestra que tanto el banano como la palma africana pueden producir cerca de 26 ton/ha/año, mientras que el arroz tiene un rendimiento de residuos de 5 ton/ha. El cuadro 9 muestra el resumen de la superficie cosechada de cada cultivo, el rendimiento en producción (MAGAP, 2015), la cantidad y el rendimiento de los residuos generados y la energía bruta total por provincia (ESIN, 2014).

Multiplicando los valores de los rendimientos de producción y de generación de residuos por el número de hectáreas promedio de cada uno de los agricultores es posible conocer estos valores para cada uno de los escenarios a modelar (véase el cuadro 10). Así, por ejemplo, la producción agrícola máxima para todos los agricultores es la del cultivo de caña de azúcar en Guayas con casi 655, 1.310 y 4.915 ton para pequeños, medianos y grandes agricultores respectivamente. En tanto que, para la provincia de Los Ríos el cultivo con mayor producción es el de banano. En términos de residuos generados por año el banano y la palma africana son los que generan mayor cantidad de residuos por año para las provincias de Guayas y Los Ríos respectivamente.

Un dato importante a considerar es el número de personas que trabajan las tierras en escenarios. A partir de datos del III Censo Nacional Agropecuario (2000) se determinó el número de personas y/o residentes en cada uno de los escenarios de producción. De la misma manera, con información del INEC (2015) se determinó que el número de personas promedio por hogar a nivel nacional es de 3,78 personas información que permitió determinar el número de hogares por escenario de producción (véase el cuadro 11).

Cuadro 9
Rendimiento de producción y de generación de residuos por hectárea y cultivo para el 2014

Cultivo	Superficie cosechada (en ha)	Rendimiento de producción (en ton/ha)	Residuos generados (en ton/año)	Rendimiento de residuos (ton/ha/año)	Energía bruta (TJ/año)
Guayas					
Arroz	254 087	3,99	1 310 380,75	5,16	17 638,26
Banano	40 846	44,92	1 097 599,14	26,87	13 857,62
Caña de azúcar	73 856	81,92	593 272,33	8,03	11 776,14
Los Ríos					
Arroz	112 171	3,84	682 811,74	6,09	9 190,92
Banano	81 266	42,98	2 048 397,75	25,21	25 861,83
Palma africana	31 634	16,04	815 487,66	25,78	10 422,56

Fuente: Modificado de ESIN, (2014).

Cuadro 10
Producción agrícola y de residuos de los cultivos seleccionados para cada escenario a modelar en las provincias de Guayas y Los Ríos

		Pequeños	Medianos	Grandes
Superficie promedio de la tierra (en ha)		8	16	60
Guayas				
Producción agrícola total (en ton/año)	Arroz	31,92	63,84	239,40
	Banano	359,36	718,72	2 695,20
	Caña de azúcar	655,36	1 310,72	4 915,20
Generación de residuos anuales (en ton/año)	Arroz	41,26	82,52	309,43
	Banano	214,97	429,95	1 612,30
	Caña de azúcar	64,26	128,53	481,97
Los Ríos				
Producción agrícola total (en ton/año)	Arroz	30,72	61,44	230,40
	Banano	343,84	687,68	2 578,80
	Palma africana	128,32	256,64	962,40
Generación de residuos anuales (en ton/año)	Arroz	48,70	97,40	365,23
	Banano	201,65	403,30	1 512,37
	Palma africana	206,23	412,46	1 546,73

Fuente: Elaboración de los autores con base en datos de ESIN, (2014); INEC (2012) y MAGAP (2015).

Cuadro 11
Número de hogares por cada escenario de producción

Escenario	Personas	Hogares
Pequeños	24	6
Medianos	64	17
Grandes	540	143

Fuente: Elaboración de los autores con base en datos del INEC, (2012) y MAGAP, (2000).

D. Definición de los cobeneficios del aprovechamiento energético de los residuos agrícolas

Una manera de medir los impactos positivos de los proyectos de mitigación es mediante los cobeneficios que producen. Los cobeneficios son aprovechamientos indirectos o secundarios de las medidas de mitigación al cambio climático (Williams, 2014). Pueden estar relacionados a la creación de nuevas plazas de empleo, mejora en la calidad ambiental, entre otros, también pueden actuar como un factor importante en la consecución de metas de desarrollo sostenible (Hinostroza et al., 2012). Sin embargo, raramente son cuantificados y valorados en términos económicos y por lo tanto, permanecen ausentes en el proceso de toma de decisiones.

Existen diferentes tipologías para categorizar a los cobeneficios. Sin embargo, una clasificación que incluye cuatro grandes categorías se detalla a continuación (Econometría Consultores, 2014):

- Sociales: implican un cambio en la calidad de vida de los individuos por lo que no se calculan en términos monetarios. Por ejemplo: empleo en el sector, cambios en los niveles de vida, cambios en niveles de pobreza, salud humana, entre otros.
- Económicos: traen un cambio en los ingresos y/o costos de los individuos o agentes económicos (fácilmente cuantificables). Por ejemplo: valor económico de la generación de empleo, cambios en los ingresos derivados de una mayor productividad, ahorros en costos de factores de producción, tiempo de viaje asociado a un medio de transporte, etc.

- Ambientales: presentan cambios en los bienes o servicios ambientales. Por ejemplo: conservación del agua, reducción de la contaminación, consumo del recurso hídrico.
- Institucionales: permiten mejorar el accionar de diferentes organizaciones, generalmente son cualitativos. Por ejemplo: programas de apoyo, asesorías, apropiación ciudadana.

A partir de esta tipología se han elegido un total de cuatro cobeneficios (tres cuantitativos y uno cualitativo) y un total de cinco indicadores asociados a estos. El cuadro 12 presenta su descripción, sus indicadores y la metodología propuesta para la valoración de cada uno. En el caso de los indicadores cualitativos (asociados a cobeneficios sociales) no se detalla ninguna metodología puesto que no es el objetivo de este estudio, sin embargo, se espera que provoquen impactos positivos en los individuos y comunidades, y sinergias con otros cobeneficios.

Cuadro 12
Cobeneficios, indicadores y metodología definida para el aprovechamiento energético de los residuos agrícolas^a

Categoría	Cobeneficio	Indicador	Descripción	Metodología de medición
Económico	Generación eléctrica	MW generados	El beneficio del aprovechamiento energético de los residuos agrícolas es la generación eléctrica. Puede distribuirse a las familias propietarias de los terrenos de donde provienen los residuos utilizados. Otra opción es la venta de la energía generada al sistema nacional interconectado.	Es posible determinar la cantidad de energía eléctrica generada al año con los datos de los residuos generados por cultivo y provincia, el LCV, el factor de capacidad de las plantas y la superficie de las tierras.
Social	Fortalecimiento de capacidades	Programas de capacitación	Asociado a la creación de fuentes de empleo para los habitantes de las zonas aledañas al área de influencia directa e indirecta de los proyectos implementados. Los objetivos específicos son: 1. Ubicar a trabajadores en empleos relacionados con la construcción, operación y mantenimiento de las plantas de generación eléctrica a partir de residuos agrícolas y relacionados a otras actividades asociadas y/o que resulten de la implantación de nueva tecnología. Adicionalmente, la oferta de empleo se diversificará y permitirá mejorar las condiciones laborales de las personas involucradas.	Cualitativo
		Diversificación y creación de empleo	2. Capacitaciones que permitan a las personas mejorar su nivel de educación y calificación como expertos en el manejo de tecnologías para el aprovechamiento energético	Cualitativo
	Mejora de calidad de vida	Incremento en el ingreso económico	Los recursos económicos influyen tanto en el comportamiento social como en la calidad de vida de las personas. Este ingreso se puede traducir en la adquisición de bienes y servicios de primera necesidad (educación, salud, etc.).	El modelo económico aplicado permite conocer los excedentes económicos en cada año de funcionamiento de las plantas, el cual debe ser repartido entre los trabajadores de las plantas para generar un beneficio en la calidad de vida de las personas.
Ambiental (directo)	Mitigación del cambio climático	tCO ₂ evitadas	Uno de los principales resultados del aprovechamiento energético de los residuos agrícolas es el número de toneladas de CO ₂ evitadas a la atmósfera.	Para determinar el número de tCO ₂ evitadas es necesario utilizar los factores de emisión provistos por el MAE y multiplicarlos por la cantidad de residuos generados por cultivo y zona. Este procedimiento se realiza en cada escenario de modelación.

Fuente: Elaboración de los autores con base en Econometría Consultores, (2014).

^a No se incluye en la valoración cuantitativa.

E. Descripción de la metodología utilizada en la valoración económica de cobeneficios y el cálculo del beneficio directo

1. Objetivos de la valoración económica

El objetivo de una valoración económica supone el intento de asignar valores cuantitativos a los bienes y servicios resultantes de una actividad productiva, independientemente de la existencia de un precio de mercado para dichos bienes o servicios (Barbier, Acreman, & Knowler, 1997). La valoración brinda las herramientas e insumos necesarios para una toma acertada de decisiones e incluso para una elaboración de políticas facultativas, en este caso surge del grado de percepción del público sobre el valor tangible de los bienes o servicios. Por tanto, es necesaria una evaluación integral que incluya todas las oportunidades de utilización alternativa del recurso (ya sea actual o futuro) y diferentes niveles del uso del recurso (directa o indirectamente), con el objeto de obtener un valor total (Tomasini, 2001).

En Ecuador, el uso de tecnologías de aprovechamiento energético ha sido altamente subutilizado debido a que no se cuenta con una valoración acertada de los beneficios directos e indirectos de su uso. Generalmente, se tiene la percepción de que este tipo de tecnologías apuntan a un aprovechamiento energético con la finalidad de evitar emisiones de carbono en la atmósfera, pero exigen una inversión inicial de capital que difícilmente será recuperada. Sin embargo, puede ser cambiada al incluir otros valores que aportan a la recuperación de capital, mediante una valoración económica total. Así, con un análisis más detallado de los costos y beneficios, es posible realizar una toma de decisiones informada que no esté basada en supuestos no comprobados.

2. Valor económico total

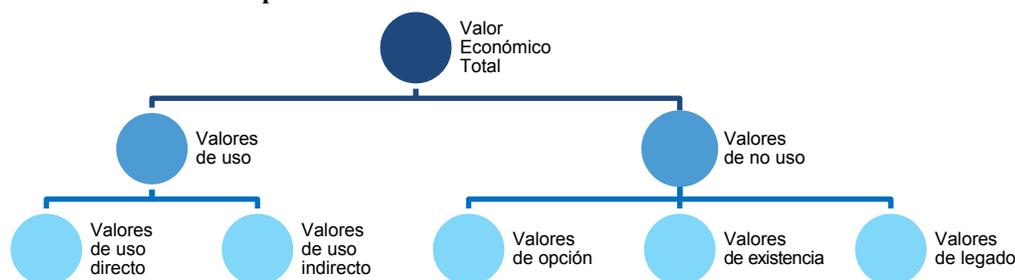
A continuación, se presenta un desglose de los elementos de una valoración económica:

- Valor Económico Total (VET): expresa el valor teórico que la sociedad está dispuesta a aceptar respecto a la importancia del bien o servicio que recibe de acuerdo a su importancia, e incorpora los diferentes niveles de uso de dicho recurso de forma directa o indirecta, inclusive desde un punto de vista cualitativo de no uso (Tomasini, 2001). Bajo este contexto, el VET es la suma de los valores de uso directo e indirecto que suponen la interacción del ser humano con el recurso, más los valores de no uso que consideran beneficios futuros y de existencia (véase el diagrama 4).
- Valores de Uso Directo (VUD): beneficios que resultan de los usos reales con un enfoque objetivo que estima costos y beneficios de bienes o servicios comparándolos con los precios de mercado.
- Valores de Uso Indirecto (VUI): beneficios que no tienen oferta y demanda establecida, sin embargo, es necesario estimar su valor con los sustitutos relacionados.
- Valor de Opción (VO): es aquel que se deriva de un posible futuro uso, se lo puede considerar como un valor de seguro considerando la incertidumbre y el nivel de aversión al riesgo.
- Valores de Legado (VL): mide el beneficio que generaciones futuras podrán obtener a partir del conocimiento que se tiene de un recurso en particular.
- Valor de Existencia (VE): son derivados de la simple existencia de un bien o servicio, es decir se valora el derecho de permanencia (Castro, 2011; Rischkowsky & Pilling, 2010).

$$\text{VET} = \text{VUD} + \text{VUI} + \text{VO} + \text{VL} + \text{VE} \quad \text{Ecuación 1}$$

Dentro de los valores de no uso la metodología no está claramente definida, y el debate en torno a los métodos de valoración sigue latente. La inclusión de los valores de opción, existencia y legado depende del alcance del análisis. Por lo que resulta prudente considerar principalmente los valores de uso directo e indirecto, sin embargo, existe el riesgo de que la valoración económica total resulte infravalorada (Rischkowsky & Pilling, 2010).

Diagrama 4
Explicación del cálculo del valor económico total



Fuente: Adaptado de Constanza et al., (1997).

3. Valoración económica de los cobeneficios del aprovechamiento energético de los residuos agrícolas en Ecuador

Dado que el principal objetivo de la valoración está en función de las reducciones de GEI, para efectos del análisis se considerará solamente los valores de uso (directo e indirecto) y el valor de legado como parte del VET. Es decir, ésta valoración debe ser considerada como una valoración parcial de los cobeneficios del aprovechamiento energético de los residuos en Ecuador ya que los valores de no uso se refieren principalmente a bienes y servicios ambientales, y en este caso a los cobeneficios a valorar. Por definición son los valores directos del uso de la tecnología. No obstante, esto no afectará el resultado final de la evaluación ya que para el análisis costo-beneficio se considerará como valor de entrada el VET, que en este caso es igual a la suma del valor de uso directo, indirecto y el valor de legado.

$$\text{VET} = \text{VUD} + \text{VUI} + \text{VL} \quad \text{Ecuación 2}$$

Para tener mayor claridad acerca de la caracterización del estudio y considerando que el beneficio directo es la reducción de GEI, se ha elaborado una tabla explicativa (véase el cuadro 13):

Cuadro 13
Tipo de valor y beneficio del aprovechamiento energético de residuos agrícolas

Tipo de valor	Tipo de beneficio	Ejemplo
Valor de uso directo	Cobeneficio material	Generación de electricidad
Valor de uso indirecto	Beneficio directo	Reducción de CO ₂
Valor de legado	Cobeneficio social	Mejora en la calidad de vida

Fuente: Elaboración de los autor con base en Constanza et al., (1997).

La valoración parcial se realiza bajo el tipo de análisis costo-beneficio, es decir, se busca monetizar los beneficios y cobeneficios del uso de tecnologías de aprovechamiento energético de residuos agrícolas, para determinar la factibilidad de la implementación de proyectos de aprovechamiento energético, dependiendo del tipo de cultivo seleccionado. Resulta pertinente la realización de los análisis de valoración para los diferentes tipos de cultivo evaluados, considerando la tecnología más apropiada para cada uno.

Para identificar los beneficios y cobeneficios del uso de una tecnología en particular se define el tipo de cultivo y tecnología, y se enlistan los beneficios directos e indirectos. Adicionalmente, se realiza una ponderación según el nivel de importancia de los cobeneficios resultantes, priorizados al momento de la valoración, dicha ponderación se realiza tomando en cuenta la percepción estilizada del público a la valoración tangible del cobeneficio (véase el capítulo IV).

La cantidad de bienes obtenidos del uso de tecnologías de aprovechamiento energético dependerá de la tecnología seleccionada, y pueden ser eléctricas, caloríficas u orgánicas. La ponderación se la realiza con el objeto de definir una prioridad al momento de realizar la valoración económica.

En todos los análisis se establece como beneficio directo la reducción de CO₂e, bajo este contexto, el método de cálculo considerado es el potencial energético de los residuos establecido en el Atlas Bioenergético de Ecuador (ESIN, 2014).

Para el análisis de costo-beneficio, en casos particulares de implementación, se debe considerar factores adicionales como el combustible, el rendimiento del producto principal y la eficiencia del sistema de aprovechamiento energético. Adicionalmente, es importante definir el alcance o el nivel de aprovechamiento de los residuos, pues los subproductos resultantes pueden tener diferentes aplicaciones de uso final (eléctrico, calorífico u orgánico) para lo cual, la valoración se ajustará a éste.

Los cobeneficios serán valorados de acuerdo al precio actual de mercado de los bienes equivalentes, con y sin intervención del gobierno (en lo que se refiere a algún tipo de subsidio. A su vez, el análisis costo-beneficio se realizará mediante un modelo financiero que obedece al valor presente neto de los ingresos por generación de energía y el costo de generación de electricidad.

$$VAN_i = \sum_i^n \left[\frac{LCOE_t EG_t}{(1 + TD)^t} \right] - In \quad \text{Ecuación (3)}$$

El cálculo del LCOE se realiza considerando otras variables más específicas tal como lo detalla la siguiente ecuación:

$$LCOE = \frac{\sum_{t=1}^n \frac{l_t + O\&M_t + CC_t + IR_t + IG_c}{(1 + WACC)^t}}{\sum_{t=1}^n \frac{EG_t}{(1 + WACC)^t}} \quad \text{Ecuación (4)}$$

Donde: VAN es el valor actual neto, LCOE representa el costo de generación de electricidad, EG es la electricidad generada, TD corresponde a la tasa de descuento, In simboliza la inversión inicial, I representa los ingresos por energía generada, O&M son los gastos operativos, CC corresponde a los costos de combustible, IR son los impuestos, IG simboliza el incentivo del gobierno, WACC es el promedio ponderado del costo de capital y t representa el periodo de evaluación.

Para este cálculo el valor del WACC sobre el cual la implementación de un proyecto de aprovechamiento energético resulta factible es cuando el VAN sea igual o mayor a cero, es decir, la tasa de rentabilidad del capital será equivalente a la determinada por la tasa interna de retorno. Por lo tanto, se puede decir que el WACC es igual a la tasa interna de retorno (TIR).

III. Definición del modelo, análisis de resultados y factibilidad

En esta sección se incorporan las cifras obtenidas para cada uno de los escenarios establecidos, mismas que fueron utilizadas dentro de la modelación en la etapa de análisis de resultados para determinar la factibilidad del proyecto mediante: la tasa interna de retorno (TIR), los incentivos por tCO₂ evitadas y el costo por tonelada de residuo generado, cuando sea pertinente. No todas las cifras que se muestran en los cuadros corresponden a valores económicos, debido a que deben ser contrastadas con los costos de implementación, por lo tanto, dichas cifras serán consideradas como insumos para la modelación, donde todos los valores económicos, sean ingresos o egresos, serán analizados para determinar la factibilidad del proyecto.

A su vez, para establecer la factibilidad de un proyecto de generación eléctrica a partir de la biomasa, y para valorar económicamente los bienes y servicios provenientes del aprovechamiento energético, se ha construido un modelo financiero que incorpora y es capaz de analizar todas las variables y valores que influyen directamente en su ejecución. Además, para obtener valores o un rango de valores que sirvan de insumo para futuros análisis y toma de decisiones, se evalúan los resultados a partir de este modelo. El cual busca interpretar las variables desde una perspectiva general, sin incurrir en detalles específicos, pues el objetivo es obtener un perfil general para todos los proyectos de aprovechamiento energético a partir de la biomasa, considerando la tecnología de turbinas de vapor previamente definida.

Es importante aclarar que, al evaluar un proyecto específico, se pueden seleccionar diferentes tecnologías dependiendo del perfil del residuo y las condiciones de producción, lo cual necesariamente requiere un análisis más profundo para interpretar la factibilidad de ejecución del proyecto. Sin embargo, mediante este análisis podremos obtener lineamientos claros para definir si el potencial de aprovechamiento energético existente es significativo y posteriormente, incursionar en estudios más concretos.

El modelo considera las variables del cuadro 14, cuyos valores son congruentes con la literatura existente y otros supuestos que se han determinado a partir de experiencias previas en proyectos específicos realizados en el país. El modelo no incorpora variabilidad en el precio de venta de energía ni inflación y asume una generación constante anual durante el tiempo de vida de la planta.

Cuadro 14
Variables de entrada del modelo financiero

Variable	Unidad	Fuente	Valor
De precio			
Precio mayorista	\$/kWh	ARCONEL	0,0967
Tarifa	\$/kWh	CONELEC	0,0810
Factor de emisión		CENACE	0,5076
Tecnológicas			
Generación anual	MWh	–	–
Factor de planta	%	EIA	59,0000
Capacidad instalada	W	–	–
Financieras			
Costo de instalación	\$/Watt	Valdez	1,8596
Capital total de inversión	\$	–	–
Participación de la deuda	%	–	0,0000
Total de deuda	\$	–	–
Tasa de interés	%	CFN	10,0000
Tiempo de la deuda	años	CFN	10,0000
Participación en el capital	%	–	–
Total de participación	\$	–	–
Operación y mantenimiento	\$/kWh	NREL	0,0104
Costo del combustible	\$/kWh	–	0,0000
Tasa de impuesto	%	SRI	30,0000
Tasa de descuento	%	SENPLADES	12,0000
Término			
Construcción	–		1,0000
Tiempo de vida	años	ARCONEL	25,0000
Construcción y tiempo de vida	años		26,0000
Social			
Número de personas por vivienda	–	INEC	3,7800
Umbral mínimo de electrificación rural/vivienda/mes	kWh	INEC	88,900
Umbral mínimo de electrificación rural/vivienda	kWh/años		–
Demanda total	W		–
Viviendas beneficiarias			
Pequeño	W	ARCONEL	100 000,0000
Mediano	W	ARCONEL	1 000 000,0000
Grande	W	ARCONEL	15 000 000,0000

Fuente: Elaboración de los autores con base en las fuentes citadas en el cuadro.

Las variables fueron ingresadas y analizadas en diferentes escenarios de pequeños, medianos y grandes productores, donde la principal variable es el potencial de generación de eléctrica anual derivada de cada de los residuos agrícolas. Para determinar el potencial eléctrico de los residuos se aplica la siguiente ecuación:

$$MWh = \frac{RS * LCV * CF}{3\ 600} * 1\ 000 \quad \text{Ecuación (5)}$$

Donde: MWh es el potencial de generación eléctrica, Rs representa la generación de residuos anuales, LCV simboliza el poder calorífico inferior y CF es el factor de la planta de generación.

Aplicando la ecuación (5) a los valores al cuadro 9, donde se consigue el potencial de generación de residuos anuales por cultivo, escenario y provincia se obtienen resultados que se utilizarán como escenarios para la modelación (véase el cuadro 15).

Consecuentemente, se obtienen 18 posibles escenarios a evaluar (véase el cuadro 16), para los cuales, las cifras de valoración obtenidas serán incorporadas para determinar la factibilidad del proyecto.

Cuadro 15
Potencial eléctrico anual de los cultivos seleccionados
(En MWh)

Guayas			
Cultivo	Pequeños	Medianos	Grandes
Arroz	90,12	180,24	675,86
Banano	447,73	895,49	3 358,05
Caña de azúcar	208,70	417,42	1 565,28
Los Ríos			
Cultivo	Pequeños	Medianos	Grandes
Arroz	106,37	212,74	797,74
Banano	419,99	839,98	3 149,92
Caña de azúcar	553,36	1 106,72	4 150,22

Fuente: Elaboración de los autores con base en la ecuación (5).

Cuadro 16
Escenarios de evaluación para la modelación

Tipo de productor	Cultivo	Ubicación	Escenario	Ubicación	Escenario
Pequeño	Arroz		1		10
	Banano		2		11
	Caña		3		12
Mediano	Arroz		4		13
	Banano	Guayas	5	Los Ríos	14
	Caña		6		15
Grande	Arroz		7		16
	Banano		8		17
	Caña		9		18

Fuente: Elaboración de los autores con base en la ecuación (5).

Para determinar la cantidad de CO₂e se utiliza el potencial bioenergético de los residuos (véase el cuadro 15) y se considera el factor de emisión del mix energético nacional, para Ecuador se utiliza el FE del IPCC. Ambos valores se reemplazan en la siguiente ecuación:

$$EM_{cultivo} = \text{Potencial energético} \left[\frac{kWh}{año} \right] * FE_{mix \text{ eléctrico nacional}} \left[\frac{kgCO_2}{kWh} \right] \quad \text{Ecuación (6)}$$

Donde, EM es la cantidad de emisiones evitadas, asumiendo la transformación total del potencial energético del residuo en electricidad y el potencial energético es potencial energético del residuo según el Atlas Bioenergético de Ecuador.

El cálculo previo determina la reducción de emisiones considerando el potencial energético de los residuos agrícolas, asumiendo su uso total.

Una vez establecidos los escenarios, se determinan las variables de salida e impacto que posteriormente deberán ser analizadas desde dos perspectivas diferentes:

- Comercial: donde los factores determinantes para definir la factibilidad son el VAN, el cual debe ser positivo, y la TIR que debe ser lo suficientemente alta como para atraer a la inversión privada. Para este estudio la tasa mínima aceptable de rendimiento (TMAR) fue considerada como la suma de la tasa de interés activa del BCE vigente a mayo 2016 (10,09%); y, la tasa pasiva referencial de una inversión a largo plazo (8,05%). Es decir, el TMAR es del 18,14%. Para que un proyecto sea viable la TIR debe ser mayor o igual al TMAR; establecida en 20% para todos los escenarios (Banco Central del Ecuador, 2016).
- Autoconsumo: donde el factor determinante para definir la factibilidad es el LCOE, el cual debe ser menor a la tarifa comercial vigente, la cual varía dependiendo del tipo de consumo por ello, se ha tomado como referencia la tarifa general para media tensión con demanda a nivel comercial e industrial: 0,081 dólares/kWh.

Las variables de salida del modelo para futuros análisis son las siguientes: capacidad instalada, generación eléctrica, tCO₂e evitadas, utilidad por venta de energía, capital de inversión, precio del residuo, incentivo, TIR, VAN y LCOE.

Para realizar el análisis, se considerarán como condiciones iniciales aquellas que están en concordancia con la situación actual del país para la implementación de proyectos de aprovechamiento energético de la biomasa, es decir:

- Costo de la tonelada de residuo: 0 dólares/ton.
- Capital de inversión: 1.859 dólares/W (el capital inicial es el promedio del rango presentado en estudios previos del MEER³).
- Incentivo por emisiones evitadas: 0 dólares/tCO₂.

Siguiendo la metodología planteada para la valoración de los beneficios del aprovechamiento energético de residuos, se evalúa cada uno de los escenarios (véase el cuadro 17).

La generación eléctrica se calculó en base a la ecuación (5). Las tCO₂e evitadas fueron obtenidas a partir de la ecuación (6); y, la utilidad por venta de energía fue resultado de la modelación del LCOE. Para este último cálculo, se consideraron los ingresos por venta de energía, costos operativos, costos de combustible, depreciación, impuestos, intereses; y, dependiendo de la composición del capital, un pago por interés sobre la deuda (véase la ecuación 4). Todos estos valores fueron ingresados en el modelo, los resultados de este escenario se pueden observar en el cuadro 17.

Cuadro 17
Ejemplo de valoración para el escenario 1

Residuo		Cáscara de Arroz		
Ubicación		Guayas		
Productor		Pequeño		
Tecnología		Turbina de Vapor		
Valores económicos	Directos	Indirectos	De legado	Tipo de beneficio
Bienes				
Generación eléctrica	90,12 MWh/año**	–	–	Cobeneficio económico
Servicios				
tCO ₂ e evitadas	–	45,75 tCO ₂ /año***	–	Beneficio directo
Utilidad por venta de energía	–	–	6 047,34 dólares/año**	Cobeneficio social

Fuente: Elaboración de los autores con base en las ecuaciones (4), (5) y (6).

Nota: ** representa importancia media y *** importancia alta.

Cuadro 18
Resultados de la modelación para el escenario 1

Variable	Unidad	Valor
Capacidad instalada	kW	17,47
Generación eléctrica	MWh	90,12
tCO ₂ e evitadas	tCO ₂ /año	45,75
Utilidad por venta de energía	dólares/año	6 047,34
Capital de inversión	dólares	32 481,26
Precio del residuo	dólares/ton	0,00
Precio del residuo	dólares/kWh	0,00
Incentivo	dólares / t CO ₂	0,00
TIR	porcentaje	19,00
VAN	dólares	31,97

Fuente: Elaboración de los autores con base en los datos reportados en el cuadro 17 y considerando el escenario 1.

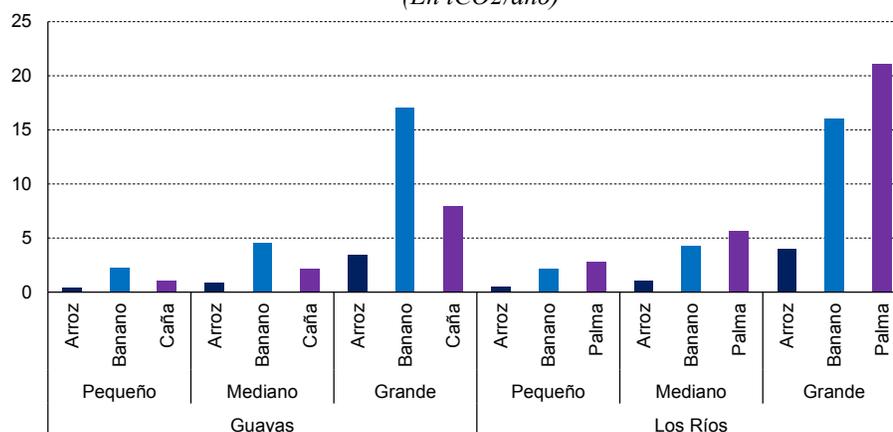
³ Comunicación personal técnico MAGAP, MEER, MAE.

Estos valores permiten realizar diversos análisis de costos, implementación de incentivos, establecimiento de precios para residuos agrícolas, reducción de emisiones de carbono y factibilidad de implementación. Los resultados se presentan en el cuadro 19, la cual muestra los resultados compilados de los 18 escenarios planteados bajo condiciones iniciales.

El gráfico 4, muestra las emisiones de carbono evitadas en cada uno de los escenarios (permanecen constantes con o sin incentivo), donde la caña, el banano y la palma son los mayores emisores. El gráfico 5, muestra el incentivo necesario para que cada escenario alcance el 20% en la TIR adicionalmente, se observan los escenarios que podrían ser autoconsumidores. Los que no lo son, tienen la factibilidad de alimentar a la red. Ahora, depende de los tomadores de decisión evaluar los resultados y determinar si se ajustan a una realidad económica nacional, al considerar los beneficios sociales y económicos para determinar el modelo de gestión y mercado más adecuado.

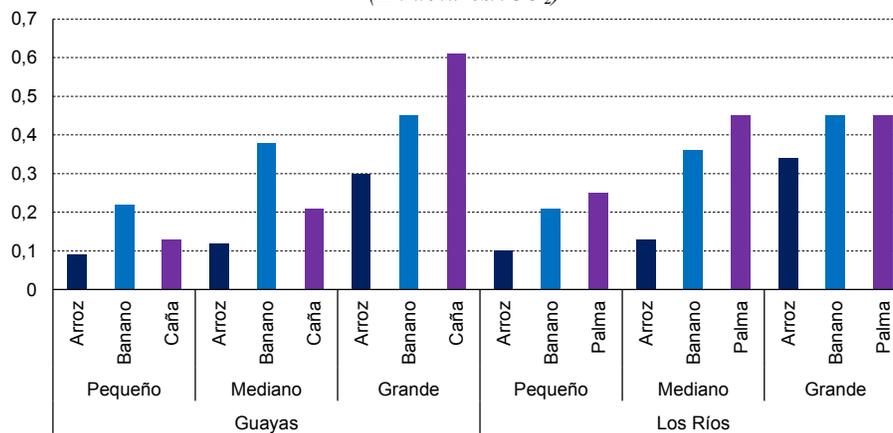
El modelo fue diseñado para optimizar el valor de los residuos agrícolas necesarios para satisfacer un valor determinado en la TIR. Sin embargo, debido a que inicialmente todos los valores de no superan el 20%, agregar un costo por tonelada a los residuos agrícolas generados, solamente reducirá la TIR en mayor proporción. No obstante, esta metodología podría utilizarse en un futuro para establecer otro tipo de incentivo que no esté basado en las emisiones de carbono.

Gráfico 4
Toneladas de CO₂ evitadas
(En tCO₂/año)



Fuente: Elaboración de los autores con base en los resultados de la modelación.

Gráfico 5
Rango de incentivos por emisiones evitadas
(En dólares/tCO₂)



Fuente: Elaboración de los autores con base en los resultados de la modelación.

Cuadro 19
Resumen de resultados bajo condiciones iniciales

Localización	Tipo de productor	Cultivo	Escenario	Capacidad instalada (en kW)	Generación eléctrica (en MWh)	Toneladas de CO ₂ evitadas (en tCO ₂ /año)	Utilidad por venta de energía (en USD/año)	Capital de inversión (en dólares)	Precio del residuo (en USD/ton)	Precio del residuo (en USD/kWh)	Incentivo (en USD/tCO ₂)	TIR (en %)	VAN	LCOE (en USD/MWh)	
Guayas	Pequeño	Arroz	1	17,47	90,12	45,75	6 674,23	34 481,26	0,00	0,00	8,95	20,00	31,97	76,21	
		Banano	2	86,78	447,73	227,27	33 158,91	161 372,19	0,00	0,00	21,65	20,00	6,43	83,02	
		Caña	3	40,45	208,70	105,93	15 455,84	75 218,33	0,00	0,00	13,16	20,00	13,79	78,47	
		Arroz	4	34,93	180,24	91,45	13 348,47	64 962,53	0,00	0,00	12,15	20,00	15,97	77,93	
	Mediano	Banano	5	173,56	895,49	454,55	66 319,47	322 751,88	0,00	0,00	37,55	20,00	3,21	91,55	
		Caña	6	80,90	417,42	211,88	30 914,22	150 448,36	0,00	0,00	20,57	20,00	6,89	82,44	
		Arroz	7	130,99	675,86	343,07	50 053,78	243 593,73	0,00	0,00	29,75	20,00	4,26	87,36	
		Grande	Banano	8	650,83	3 358,05	1 704,55	248 695,49	1 210 310,18	0,00	0,00	45,04	20,00	2,60	95,57
	Caña		9	303,37	1 565,28	794,54	115 924,01	564 160,85	0,00	0,00	61,32	20,00	1,84	104,30	
	Los Ríos	Pequeño	Arroz	10	20,68	106,37	53,99	7 877,80	38 338,28	0,00	0,00	9,53	20,00	27,08	76,52
			Banano	11	81,40	419,99	213,19	31 104,26	151 373,22	0,00	0,00	20,66	20,00	6,85	82,49
			Caña	12	107,25	553,36	280,89	40 981,57	76 676,57	0,00	0,00	25,40	20,00	5,50	85,03
Mediano		Arroz	13	41,23	212,74	10,99	15 755,54	302 746,45	0,00	0,00	13,31	20,00	13,53	78,54	
		Banano	14	162,80	839,98	426,37	62 208,59	398 885,37	0,00	0,00	35,58	20,00	3,43	90,49	
		Caña	15	214,50	1 106,72	561,77	81 962,95	398 885,37	0,00	0,00	45,04	20,00	2,60	95,57	
Grande	Arroz	16	154,61	797,74	404,93	59 079,98	287 521,38	0,00	0,00	34,08	20,00	3,61	89,69		
	Banano	17	610,49	3 149,92	1 598,90	233 281,89	1 135 295,42	0,00	0,00	45,04	20,00	2,61	95,60		
	Caña	18	804,36	4 150,22	2 106,65	307 362,89	1 495 824,99	0,00	0,00	45,01	20,00	2,59	95,50		

Fuente: Elaboración de los autores con base en los resultados de la modelación y considerando todos los escenarios propuestos.

IV. Barreras de implementación de la tecnología

En el análisis de las barreras para la implementación de proyectos de aprovechamiento energético para la producción de energía eléctrica con base en biomasa residual se realizaron algunos acercamientos con los principales actores del sector, involucrados en proyectos emblemáticos en los que ya se utilizaron residuos agrícolas para la generación de algún tipo de energía, como el proyecto en base a cuesco de palma y el proyecto Piñón Galápagos.

Entre los actores con mayor experiencia en este tipo de proyectos se encuentran: la compañía ENERPRO —entidad desarrolladora del Proyecto Cuesco de Palma—, la Dirección de Biomasa y Cogeneración del Ministerio de Electricidad y Energía Renovable (MEER), el Ministerio de Agricultura, Ganadería, Acuacultura y Pesca (MAGAP), el Instituto Nacional de Eficiencia Energética y Energías Renovables (INER), el Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura (IICA) y la Alianza en Energía y Ambiente (AEA) —liderada por IICA—.

A través de entrevistas personales y escritas, documentos e informes de los proyectos, documentos e informes de talleres organizados por la AEA se han identificado una serie de barreras que han impedido que el aprovechamiento energético de residuos agrícolas prolifere en el país. Estas barreras se han clasificado en tres grandes grupos: capacidad y experiencia, articulación/coordinación de actores y mercado (véase el cuadro 20).

Cuadro 20
Barreras de implementación

Tipo de barreras	Subtipo de barreras	Resultados
Capacidad y experiencia	Falta de capacidades técnicas y experiencia en el sector público	Desconocimiento, incertidumbre, desconfianza y resistencia
	Falta de capacidades técnicas y experiencia en el sector privado	Desconocimiento, incertidumbre, desconfianza y resistencia
Articulación/coordinación de actores	Baja articulación de actores públicos y privados	Visión desarticulada, desaprovechamiento de oportunidades y dobles esfuerzos
	Falta de política pública/plan estratégico para el aprovechamiento energético	Visión desarticulada, desaprovechamiento de oportunidades y dobles esfuerzos
Mercado	Subsidio energía eléctrica, diésel, gas natural	Desmotivación, inestabilidad, in-sustentabilidad económica e inviabilidad
	Falta de proveedores de tecnología específica	
	Especulación de precios de biomasa	

Fuente: Elaboración de los autores con base en entrevistas personales y talleres organizados por la AEA.

A. Barreras relacionadas a la capacidad y experiencia

- Falta de capacidades técnicas y experiencia en sectores públicos: basados en la experiencia de la AEA, una barrera grande para la implementación de la tecnología de aprovechamiento energético de residuos en el país –y en toda la región andina en general– se encuentra en la falta de capacidades técnicas en el sector público. El desconocimiento sobre el tema dificulta la validación de proyectos por parte de los gobiernos locales y el central, ya que los considera como algo nuevo que genera incertidumbre y desconfía en los resultados.
- Falta de capacidades técnicas y experiencia en sectores privados: en el país existen relativamente pocas experiencias de reaprovechamiento energético de biomasa residual incluso, se han identificado experiencias anteriores en las que los actores privados las perciben como algo nuevo. Por tanto, existe desconfianza sobre los beneficios lo que a su vez genera resistencia hacia la adopción (por ejemplo: Proyecto Piñón Galápagos).

B. Barreras relacionadas a la articulación/coordinación de actores

- Baja articulación entre actores públicos y privados: a pesar de los esfuerzos de la AEA, que ha coordinado varios encuentros entre los actores involucrados para lograr el reaprovechamiento energético de biomasa, resulta evidente que el trabajo coordinado todavía tiene que reforzarse. Existe el interés de compartir información y trabajar en conjunto, sin embargo, falta fortalecer y dar seguimiento a los espacios y metodologías para potenciar el trabajo colaborativo ya que, esta carencia, promueve una visión desarticulada, incrementa el riesgo de doble esfuerzo y desaprovechamiento de oportunidades.
- Falta de una política pública/plan estratégico específico y holístico: aunque el reaprovechamiento energético de biomasa residual tiene relevancia dentro de varios planes, programas, regulaciones públicas (por ejemplo: Plan Nacional del Buen Vivir, Estrategia Nacional de Cambio Climático, regulaciones del CONELEC y ARCONEL), no existe un plan específico para la aplicación de esta tecnología, que establezca lineamientos claros en base a objetivos holísticos que incluya las perspectivas de todos los sectores involucrados. En parte, esto es causa y consecuencia de la baja articulación de actores y tiene resultados similares a los descritos en el párrafo anterior.

C. Barreras relacionadas al mercado

- Subsidios a la energía eléctrica, diésel y gas natural: generan una barrera de entrada para la cogeneración de energía a partir del uso de la biomasa, ya que no resultan en una inversión atractiva dado los bajos precios de venta establecidos por el ARCONEL disminuyendo así, la competitividad de esta tecnología.
- Falta de proveedores de tecnología específica: en Ecuador existen pocas empresas que venden el equipo necesario para la generación de energía por ciclo de rankine, aun así, su servicio es limitado. En general, venden los equipos por partes y no ofrecen acompañamiento técnico, seguimiento en la instalación o mantenimiento. Esto exige que el usuario tenga la capacidad de realizar, por sí mismo, las adaptaciones necesarias, limitando la entrada de aquellos que no tienen la experiencia requerida.
- Especulación de precios para la biomasa: en proyectos pioneros, la especulación de los precios se presentó como una barrera para la implementación y mantenimiento de proyectos de reaprovechamiento de biomasa. La falta de regulación de los precios de residuos agrícolas genera inestabilidad ya que tienden a generar volatilidad debido al alto valor que tienen en la cadena productiva de otras industrias.

V. Conclusiones

Retomando los seis objetivos claves de este producto se determinó que:

- Los cultivos más apropiados para la valoración económica de los cobeneficios en el aprovechamiento energético de los residuos agrícolas son la palma africana y el banano, como cultivos de exportación; y, el arroz y la caña de azúcar, como cultivos de subsistencia. Estos fueron seleccionados en base a la producción de energía bruta anual, la superficie cultivada, el tipo de residuo generado y la tendencia histórica de producción. Las zonas de estudio seleccionadas fueron la provincia de Los Ríos y la del Guayas, debido a que son las áreas en donde la producción de los cultivos seleccionados es mayor. Por su parte, la selección de cultivos y de las zonas de estudio se centró en el criterio de aprovechamiento máximo de residuos agrícolas para la generación de energía.
- La energía eléctrica es el tipo de energía más apropiado para el estudio, ya que genera índices tangibles y transformables a valores monetarios, permitiendo un análisis claro de los cobeneficios de reaprovechamiento. Con base en el poder calorífico inferior y los porcentajes del contenido de humedad y de ceniza, se determinó que el método más apropiado para la generación de energía eléctrica a partir del aprovechamiento de los residuos de los productos seleccionados es la combustión.
- Dentro de las tecnologías de combustión se seleccionó la tecnología de generación de energía por medio de turbinas de vapor, basada en el ciclo termodinámico de Rankine, debido a su madurez y versatilidad. Por un lado, es una de las tecnologías más usadas y confiables en el mundo, por otro, tiene la ventaja de que se puede utilizarse para cualquier tipo de combustible y en cualquier estado (sólido, líquido y gaseoso), adecuado para una amplia gama de cultivos.
- Para la valoración económica de los cobeneficios de reaprovechamiento energético de residuos de los cultivos seleccionados se debe realizar un desglose claro de cobeneficios y una ponderación de la percepción del público sobre estos para determinar prioridades. Esto se calculó mediante la fórmula $VT = VUD + VUI + VL$.
- El beneficio directo (reducción de emisiones de CO₂) se determinó considerando el factor de emisión (FE) del mix energético nacional del IPCC y el potencial energético (PE) del residuo según el Atlas Bioenergético de Ecuador mediante la fórmula: $EM = PE * FE$.

- El análisis de las variables de salida del modelo financiero para cada uno de los escenarios propuestos muestra que de implementarse los proyectos con las condiciones iniciales de modelación todos presentarían un VAN positivo, es decir, todos los son factibles para su implementación. Sin embargo, se contrastan con los valores de la tasa interna de retorno. A nivel de cultivos el de arroz es el que presenta mejores condiciones a pequeña, mediana y gran escala en ambas provincias, con una TIR cercana al 20%.
- El monto del incentivo de la reducción de emisiones de carbono, que debería existir para poder alcanzar una TIR del 20%, varía desde los 8,95 dólares en el caso del arroz para pequeños productores hasta los 61,32 dólares en el caso de la caña de azúcar para los grandes productores, ambos casos en la provincia del Guayas.
- La reducción de emisiones de CO₂ se produce en todos los escenarios, obteniendo las menores reducciones para la palma africana, caña de azúcar y el banano con valores cercanos a 2, 1,5 y 800 miles de tCO₂/año.
- Se encontraron tres tipos de barreras para la implementación de la tecnología: capacidad y experiencia, articulación de actores y mercado. La primera, está relacionada con la falta de conocimiento y de capacidades técnicas por parte de los gobiernos locales, el central y los actores privados. Dificultando la reducción de la incertidumbre acerca de los resultados del proyecto pero aumentando la confianza por parte de los productores.
- La desarticulación de actores, se relaciona con la desconexión entre actores públicos y privados y la falta de interés en el trabajo colaborativo. Adicionalmente, la falta de políticas públicas y planes específicos de implementación generan retrasos y obstáculos al articular a los involucrados en el problema.
- Las barreras relacionadas al mercado (presencia de subsidios, falta de proveedores y especulación en los precios de los residuos), generan inestabilidad y afectan la rentabilidad y sostenibilidad de proyectos de aprovechamiento energético. La generación de políticas públicas que promuevan el uso de este tipo de residuos para el aprovechamiento energético además de beneficiosa para el ambiente, podría crear una oportunidad de negocio atractiva para los agricultores además de generar fuentes de empleo y oportunidades para el fortalecimiento de capacidades al ubicar a trabajadores en actividades relacionadas con la construcción, operación y mantenimiento de las plantas de generación eléctrica a partir de residuos agrícolas y relacionados a otras actividades asociadas y/o que resulten de la implementación de nuevas tecnologías.
- El modelo planteado explora la posibilidad de establecer un valor o rango de valores por tonelada de residuos, sin embargo, no se ha generado ningún valor debido a que la tasa de retorno de la inversión no llega a un valor lo suficientemente atractivo para la inversión privada. Es decir, los resultados indican que el valor por tonelada de residuo solamente arrojaría una tasa interna de retorno menos favorable, por tanto, se concluye que, para la implementación de este tipo de proyectos, es necesario un valor mínimo o nulo del residuo, presentes en apiladoras o procesadoras de los productos agrícolas. En conclusión, se recomienda la articulación con estos actores y a su vez, la presentación de los resultados de este estudio para su evaluación y determinación de la factibilidad económica.

VI. Recomendaciones

- Aunque el estudio se basa en la tecnología de turbinas de vapor también existen otros tipos (motores térmicos, calderos, etc.) que, dependiendo del perfil del proyecto, pueden resultar aún más favorables y atractivos para la inversión. Por tanto, se recomienda utilizar el estudio como un primer acercamiento a la factibilidad de implementación para posteriormente, realizar un análisis más detallado que establezca una comparativa entre tecnologías con el fin de determinar la más favorable. Adicionalmente, se recomienda recurrir a estudios que busquen determinar el costo del capital de inversión por tipo de tecnología disponible en Ecuador.
- El desarrollo de estudios específicos que tomen en cuenta factores que pueden afectar la producción agrícola y, por lo tanto, la generación de residuos permitiría generar medidas adaptativas que aseguren el cumplimiento de las metas de producción planteadas.
- El presente estudio asume que las áreas de tierra cultivadas son utilizadas únicamente para la producción de los cultivos seleccionados, sin embargo, las fincas agrícolas están conformadas por mosaicos de producción en los que se desarrollan diferentes cultivos. Además, pueden existir otras prácticas de manejo que influyen en la producción final de los cultivos y residuos. En este contexto, es recomendable generar escenarios de producción que tomen en cuenta distintos criterios de manejo para ajustar los valores de producción de residuos anuales.

Bibliografía

- Anwar, M. R., Li Liu, D., Macadam, I., & Kelly, G. (2013), Adapting agriculture to climate change: a review. *Theoretical and applied climatology*, 113(1-2), 225-245.
- Banco Central de Ecuador. (2016), Tasas de interés. Disponible en: <http://contenido.bce.fin.ec/docs.php?path=%2Fdocumentos%2Festadisticas%2FSectorMonFin%2FTasasInteres%2FIndice.htm>.
- _____. (2015), *Información estadística mensual No.1963 Septiembre 2015 –Exportaciones por producto principal*–. Disponible en: <http://contenido.bce.fin.ec/home1/estadisticas/bolmensual/IEMensual.jsp>.
- Barbier, E. B., Acreman, M., & Knowler, D. (1997), *Economic valuation of wetlands: a guide for policy makers and planners*.
- Basu, P. (2013), *Biomass gasification, pyrolysis and torrefaction: practical design and theory*: Academic press.
- Cameron (2014), Cambio Climático: Implicaciones para la agricultura. Hallazgos claves del quinto informe de evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático. University of Cambridge.
- Castro, M. (2011), Una valoración económica del almacenamiento de agua y carbono en los bofedales de los páramos ecuatorianos la experiencia en Oña Nabón Saraguro Yacuambi y el Frente Suroccidental de Tungurahua. *EcoCiencia. Wetlands International/UTPL/MAE. Quito: Integraf*.
- CIA (2015), The world fact book. Disponible en: <https://www.cia.gov/library/publications/the-world-factbook/geos/ec.html>.
- CIAT (2014), Evaluación de la vulnerabilidad al cambio climático de la agricultura en la región Andina de Ecuador. *CIAT Políticas en Síntesis*, 15, 6.
- Constanza, R. et al. (1997), The value of the world's ecosystem services and natural capital. *Nature* 387: 253-260.
- Daza, E. (2015), Problemáticas de la tierra en el Ecuador. Disponible en: <http://lalineadefuego.info/2015/06/23/problematicas-de-la-tierra-en-el-ecuador-por-esteban-daza-cevallos/>.
- Econometría Consultores (2014), Desarrollo y aplicación piloto de la metodología de evaluación de los cobeneficios de acciones de mitigación del cambio climático en Colombia.
- El Agro (2014), El Agro y su importancia en la economía. Disponible en: <http://www.revistaelagro.com/2015/04/29/el-agro-y-su-importancia-en-la-economia/>.
- ESIN (2014), Atlas bioenergético de la República de Ecuador.
- FAO (2015), Emissions–agriculture. Disponible en: http://faostat3.fao.org/browse/G1/*/*E.
- Frías San Román, J. (1985), Posibilidades de aprovechamiento económico de la biomasa residual. *Agricultura y sociedad*, 34, 219-236.
- Hinostroza, M. L. et al. (2012), *Measuring, Reporting, Verifying. A Primer On Mrv For Nationally Appropriate Mitigation Actions*: UNEP Risø Centre on Energy, Climate and Sustainable Development. Department of Management Engineering. Technical University of Denmark (DTU).
- INEC (2012), Encuesta de Superficie y Producción Agropecuaria Continua.

- IPCC (2014a), Cambio climático 2014. Impactos, adaptación y vulnerabilidad. Resumen para responsables de políticas.
- _____ (2014b), *Climate Change 2014. Contribution of working groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Geneva, Switzerland: IPCC.
- Jiménez, S., Castro, L., Yépez, J., & Wittmer, C. (2012), Impacto del cambio climático en la agricultura de subsistencia en el Ecuador.
- Kapooria, R., Kumar, S., & Kasana, K. (2008), An analysis of a thermal power plant working on a Rankine cycle: A theoretical investigation. *Journal of Energy in Southern Africa*, 19(1), 77-83.
- MAE (2014a), Aprovechamiento Energético de Residuos Agropecuarios. Enfocado a la Mitigación del cambio climático, Ecuador, Quito.
- _____ (2014b), *Aprovechamiento Energético de Residuos Agropecuarios. Enfocado a la Mitigación del cambio climático*, Ecuador, Quito.
- _____ (2012), Estrategia Nacional de Cambio Climático del Ecuador 2012–2025, Ecuador, Quito.
- _____ (2011), Segunda Comunicación Nacional sobre Cambio Climático de Ecuador. In L. Cáceres, Núñez, A., Romero, R., & Viteri, S (Ed.).
- MAGAP (2015), Boletín Situacional 2014. Disponible en: <http://sinagap.agricultura.gob.ec/>.
- _____ (2000), Tercer Censo Nacional Agropecuario.
- Montenegro, J. (2013), Panorama de las energías renovables y de la eficiencia energética en América Latina. *Observatorio de Política Socio Ambiental*.
- Mosier, A. et. al. (1998), Mitigating agricultural emissions of methane. *Climatic Change*, 40(1), 39-80.
- Pasangulapati, V. et. al. (2012), Effects of cellulose, hemicellulose and lignin on thermochemical conversion characteristics of the selected biomass. *Bioresource technology*, 114, 663-669.
- Petromercado (2015), Poder calorífico inferior y superior. Disponible en: <http://petromercado.com/blog/37-articulos/105-poder-calorifico-inferior-y-superior.html>.
- Rischkowsky, B., & Pilling, D. (2010), La situación de los recursos zoogenéticos mundiales para la alimentación y la agricultura.
- San Román, J. F. (1985), Posibilidades de aprovechamiento económico de la biomasa residual. *Agricultura y sociedad*(34), 219–236.
- Santucci L, Puhl I, Maqsood A, Enayetullah I, & Agyemang-Bonsu W. (2015), Valuing the sustainable development co-benefits of climate change mitigation actions: The case of the waste sector and recommendations for the design of nationally appropriate mitigation actions (NAMAs). *ESCAP*.
- Smith, K., & Conen, F. (2004), Impacts of land management on fluxes of trace greenhouse gases. *Soil Use and Management*, 20(2), 255–263.
- Smith, P., et. al. (2008), Greenhouse gas mitigation in agriculture. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 363(1492), 789-813.
- Tomasini, D. (2001), Valoración económica del ambiente. *Impacto ambiental en Agrosistemas*. L. Giuffrè, Ed. Facultad de Agronomía-UBA. Buenos Aires.
- Trávez, D. (2011), Estado del Arte y Novedades de la Bioenergía en el Ecuador. *Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura*.
- Universidad de Chile (2002), "Ciclos de vapor abierto y Rankine", [en línea], Santiago de Chile, https://www.cec.uchile.cl/~roroman/cap_08/cic-vapor.htm.
- Williams, C. (2014), International Experiences with Quantifying the Co-Benefits of Energy-Efficiency and Greenhouse-Gas Mitigation Programs and Policies.

En Ecuador, la agricultura es uno de los sectores más importantes de la economía nacional, no sólo acoge un elevado porcentaje de la fuerza laboral sino que además representa casi una tercera parte de las exportaciones del país. En contraparte, las actividades agrícolas son particularmente vulnerables a los efectos del cambio climático, responsables de una alta proporción de las emisiones totales de gases de efecto invernadero que bien, podrían ser aprovechadas para la generación de energía eléctrica a través del uso eficiente de las tecnologías disponibles.

El presente estudio muestra, por primera vez, una valoración económica de co-beneficios para el aprovechamiento energético de los residuos de cuatro cultivos agrícolas para tres grandes escenarios de tenencia de la tierra y aunque sólo utiliza turbinas de vapor, reconoce la existencia de otras herramientas que, dependiendo del perfil del proyecto, podrían ser más favorables y atractivas para la inversión. Por último, resalta la necesidad de crear políticas públicas que promuevan el aprovechamiento energético ya que, además de beneficiosas para el ambiente, podrían crear una oportunidad de negocio atractiva para los agricultores.