



Localización y producción potencial de una planta de pirolisis para la valorización de residuos agrícolas

Location and potential production of a pyrolysis plant for the recovery of agricultural waste

Localização e produção potencial de uma planta de pirólise para a recuperação de resíduos agrícolas

Juan Ferrer-Gutiérrez ^I

juanpedroferrer@hotmail.com

<https://orcid.org/0000-0002-0193-9197>

Jefferson Marcheno-Revilla ^{II}

jmarcheno@utmachala.edu.ec

<https://orcid.org/0000-0003-4732-1293>

Susana Blacio-Toro ^{III}

sublato@yahoo.es

<https://orcid.org/0000-0003-0619-9578>

Thalía Vera-Infante ^{IV}

thaliaverai@gmail.com

<https://orcid.org/0000-0002-7076-2639>

Correspondencia: juanpedroferrer@hotmail.com

Ciencias naturales

Artículo de revisión

***Recibido:** 15 de octubre de 2020 ***Aceptado:** 10 de noviembre de 2020 * **Publicado:** 05 de diciembre de 2020

- I. Magister en Ingeniería Química, Ingeniero Químico, Universidad Técnica de Machala, Machala, Ecuador.
- II. Master Universitario en Gestión Sostenible y Tecnologías del Agua, Ingeniero en Geología y Minas, Universidad Técnica de Machala, Machala, Ecuador.
- III. Magister en Química Aplicada, Doctor en Química Industrial, Químico Industrial, Universidad Técnica de Machala, Machala, Ecuador.
- IV. Universidad Técnica de Machala, Machala, Ecuador.

Resumen

La presente investigación tuvo como objetivo determinar la localización óptima de una planta de pirólisis rápida para la provincia de El Oro y estimar la producción potencial de biochar y bio-oil de residuos de banano y arroz, mediante el método cualitativo de matriz de puntos. Por otra parte, a través de la revisión documental de la superficie del cultivo de banano y arroz obtenido de la ESPAC y el rendimiento promedio de bio-oil y biochar, se estimó la producción potencial de bio-oil y biochar, obteniéndose como resultado que la producción potencial de bio-oil a partir de la pirólisis de residuos de banano y arroz es de 458 010 ton/año y 16 394 ton/año respectivamente para un rendimiento promedio del 50% reportado en la literatura para la mayoría de matrices de origen vegetal. Así mismo, con respecto al biochar, para un rendimiento promedio del 12%, la producción potencial es de 109 922 ton/año para residuos de banano y 3 934 ton/año para residuos de arroz. Por su parte, la localización óptima para la planta es en la parroquia el Retiro, debido a que cuenta con todos los servicios básicos necesarios para la construcción de la infraestructura, las vías de acceso conectan a diferentes puntos de la provincia para el abastecimiento de la biomasa permitiendo la fácil recolección y transporte del centro de acopio hasta la planta.

Palabras clave: Residuos agrícolas; pirólisis rápida; bio-oil; biochar.

Abstract

The objective of this research was to determine the optimal location of a rapid pyrolysis plant for the province of El Oro and to estimate the potential production of biochar and bio-oil from banana and rice residues, by means of the qualitative dot matrix method. On the other hand, through the documentary review of the surface of the banana and rice cultivation obtained from the ESPAC and the average yield of bio-oil and biochar, the potential production of bio-oil and biochar was estimated, obtaining as a result that the potential production of bio-oil from the pyrolysis of banana and rice residues is 458,010 tons / year and 16,394 tons / year respectively for an average yield of 50% reported in the literature for most of the origin matrices vegetable. Likewise, with respect to biochar, for an average yield of 12%, the potential production is 109,922 tons / year for banana residues and 3,934 tons / year for rice residues. For its part, the optimal location for the plant is in the Retiro parish, because it has all the basic services necessary for the construction of the

infrastructure, the access roads connect different points of the province to supply the biomass allowing easy collection and transport from the collection center to the plant.

Keywords: Agricultural residues; fast pyrolysis; bio-oil; biochar.

Resumo

O objetivo desta pesquisa foi determinar a localização ideal de uma planta de pirólise rápida para a província de El Oro e estimar a produção potencial de biochar e bio-óleo a partir de resíduos de banana e arroz, por meio do método qualitativo matricial. Por outro lado, através da revisão documental da superfície da cultura da banana e do arroz obtida na ESPAC e do rendimento médio do bio-óleo e biocarvão, estimou-se a produção potencial de bioóleo e biocarvão, obtendo-se como resultado que a produção potencial de bioóleo a partir da pirólise de resíduos de banana e arroz é de 458.010 toneladas / ano e 16.394 toneladas / ano, respectivamente, para um rendimento médio de 50% relatado na literatura para a maioria das matrizes de origem vegetal. Da mesma forma, com relação ao biochar, para um rendimento médio de 12%, a produção potencial é de 109.922 toneladas / ano para resíduos de banana e 3.934 toneladas / ano para resíduos de arroz. Por seu turno, a localização óptima da central é na freguesia do Retiro, pois dispõe de todos os serviços básicos necessários à construção das infra-estruturas, as vias de acesso ligam diferentes pontos da província para abastecer os biomassa permitindo fácil coleta e transporte do centro de coleta até a planta.

Palavras-chave: Resíduos agrícolas; pirólise rápida; Bio-óleo; biochar.

Introducción

En la actualidad la búsqueda de fuentes de energías alternativas y sostenibles se ha convertido en un tema de interés mundial debido a que los combustibles fósiles (responsables del 73% de la producción de CO₂) se utilizan de forma continua para satisfacer la mayor parte de la demanda energética global. Esto provoca un aumento en las concentraciones de CO₂ en la atmósfera y preocupaciones por el calentamiento global¹. Estas nuevas fuentes de energías se basan en el aprovechamiento de residuos agroindustriales, los cuales se componen principalmente de biomasa lignocelulósica. Los residuos de lignocelulosa han ganado cada vez más atención debido a sus propiedades mecánicas y térmicas, renovabilidad, amplia disponibilidad, no toxicidad, bajo costo y biodegradabilidad². La amplia gama de lignanos y celulosas contenidas en residuos

agroindustriales les otorga un enorme potencial como materia prima para procesos de conversión química y biotecnológica.

Ecuador es un país de gran expansión vegetativa, dedicado a la plantación de diversos cultivos; especialmente de banano en todas sus variedades y en menor proporción arroz, cacao, maíz, flores, entre otros, generando grandes cantidades de residuos. Los residuos agroindustriales generados durante la producción agrícola bananera y arroceras no son aprovechados de manera apropiada. Estos residuos ocasionan consecuencias ambientales significativas: quema a cielo abierto y apilamiento al margen de cuerpos de agua³. En el país se producen durante la siembra y cosecha de arroz 1 714,912 Ton al año de residuos, mientras que en la provincia de El Oro los cultivos de banano generan 198,602 de toneladas de residuos lignocelulósicos anuales⁴, debido a que por cada tonelada de banano cosechado, 100 kg de fruta se rechaza, y aproximadamente cuatro toneladas de residuos lignocelulósicos se genera (tres toneladas de pseudotallo, 160 kg de tallos, 480 kg de hojas y 440 kg de cáscara). Estos tipos de residuos se pueden llegar a transformar en productos nuevos con valor económico mediante la implementación de tecnologías de conversión termoquímica de biomasa como es la pirólisis rápida que comprende la descomposición de la estructura molecular original de un determinado compuesto a través de la acción de calor, las partículas generalmente se calientan entre 400 y 500 C, en atmósfera inerte o con baja concentración de oxígeno, provocando la formación de un residuo rico en carbono (bio char) y una fracción volátil compuesta por gases y vapores orgánicos condensables (bio oil)^{5,6}.

De acuerdo al contexto mencionado, esta investigación tiene como objetivo central determinar la localización óptima y estimar la producción potencial de biochar y bio-oil (principales productos de pirólisis) de una planta de pirólisis rápida de residuos de banano y arroz generados en la provincia de El Oro, fomentando prácticas de economía circular, mitigando los efectos adversos al ambiente, potenciando el desarrollo económico.

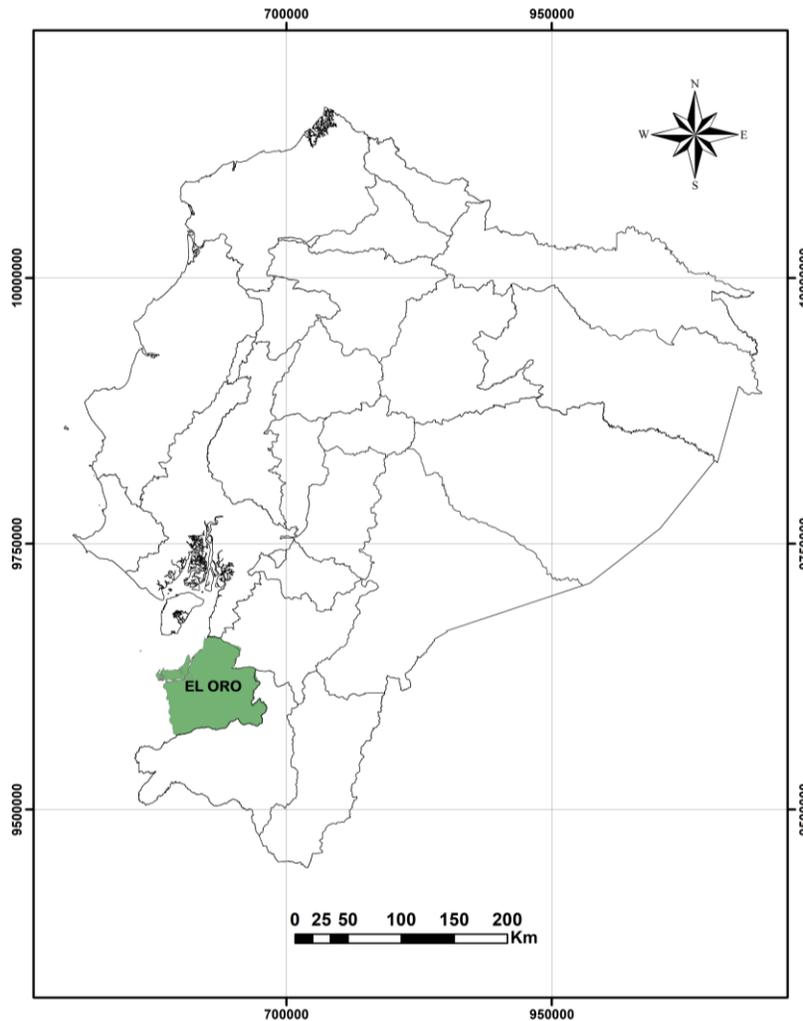
Metodología

Área de estudio

La provincia de El Oro se encuentra situada en la región Litoral o Costa, Sur del Ecuador como se muestra en la Figura 1. El área que ocupa es de aproximadamente 5 879 km², cuenta con un

clima variado, con temperaturas que oscilan entre 12-35°C, temperatura promedio de 25°C. Las condiciones climáticas y el tipo de suelo convierten a la zona, como óptima para el emplazamiento de la planta, considerándose a nivel mundial como una de las más productoras y exportadoras de banano.

Figura 1: Ubicación geográfica de la provincia de El Oro

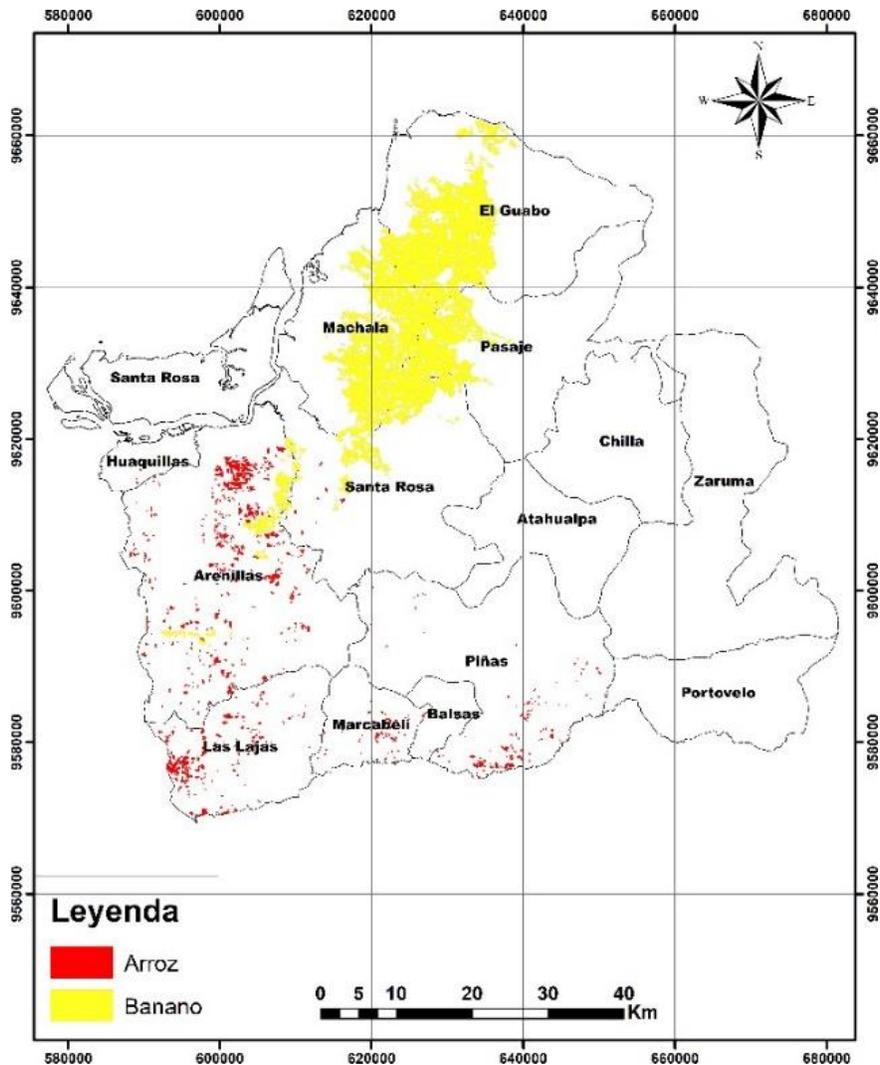


Producción total de residuos lignocelulósicos

Para la estimación de residuos lignocelulósicos se obtuvo las estadísticas de cultivos de la provincia de El Oro, disponibles en el Ministerio de Agricultura y el Instituto Nacional de Estadísticas en el ESPAC (Encuesta de Superficie y Producción Agropecuaria Continua), son las principales fuentes de datos de producción, área de cultivo, rendimiento del banano y arroz. En

la Figura 2 se puede visualizar el mapa de los cultivos de banano y arroz de la provincia del Oro, el color amarillo representa al sembrío del banano y el rojo al del arroz, los cantones que generan más cultivos de banano son Machala, El Guabo, Pasaje, Santa Rosa, y Arenilla, y para el cultivo de Arroz los cantones Arenillas, Las Lajas, Marcabéi, Piñas, y Huaquillas, aunque la mayor producción está en el cantón Arenillas.

Figura 2: Superficie cultivada de banano y arroz en la provincia de El Oro



Producción potencial de, bio oil y derivados

La producción teórica de biomasa se determinó mediante el análisis de la superficie del cultivo de banano y arroz en la zona objetivo a partir del mapa de uso de la tierra y la información

estadística del cultivo obtenido de la ESPAC. A partir de estos datos y la relación residuo/producto se estimó el Potencial Teórico de Biomasa (PTB), que es la cantidad total de residuos agrícolas generados en la superficie objetivo (Ec.1), debido a que la producción está directamente relacionada a la cantidad de residuos de banano y arroz.

$$PTB = SC * RRP \quad \text{Ec. 1}$$

Donde:

SC es la Superficie cultivada

RRP es el Relación Residuo Producto

Finalmente se efectuó una revisión documental para determinar la producción potencial de bio-oil y biochar mediante los rendimientos en masa promedio de bio oil y biochar (Ec. 2) para procesos de pirolisis rápida y los rendimientos en masa promedio de las fracciones constituyentes.

$$PPB = PTB * RP \quad \text{Ec. 2}$$

Donde:

PPB es la Producción Potencial de Bio-oil o Biochar

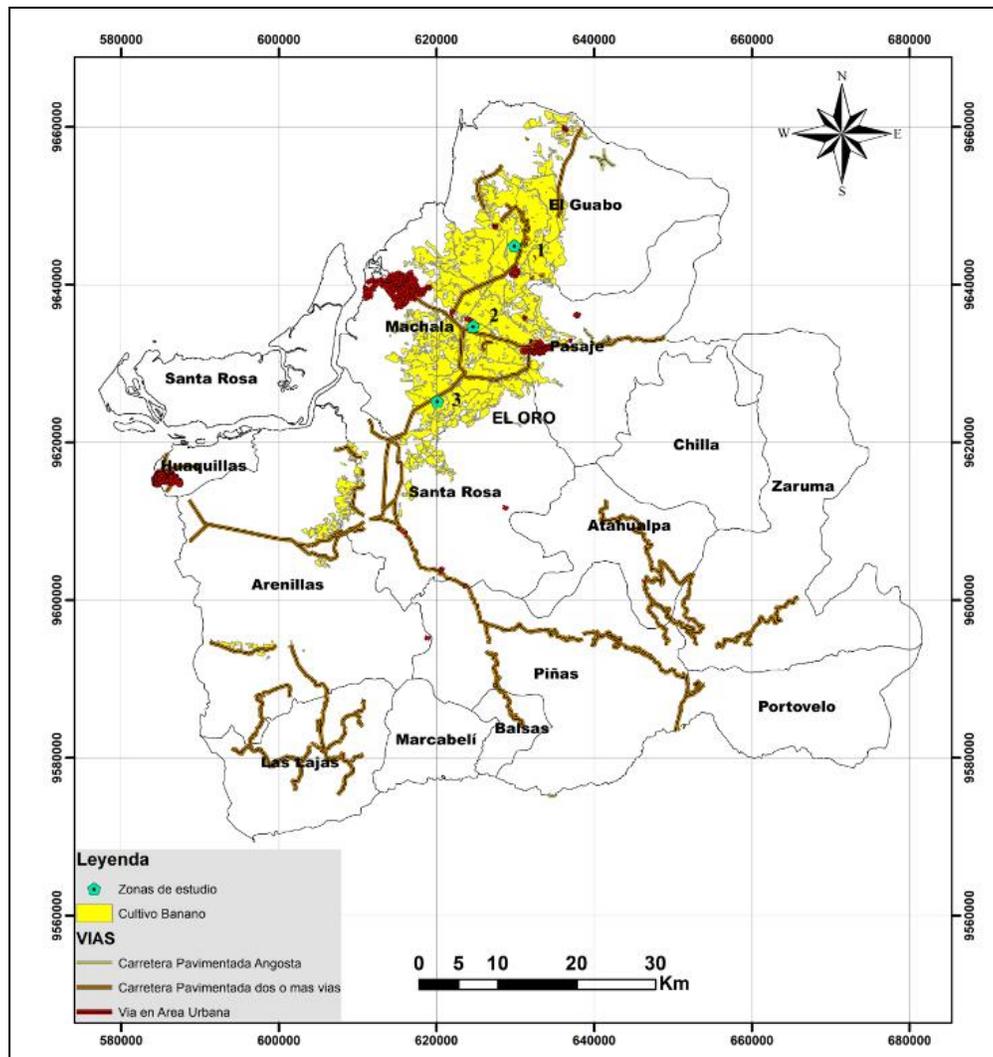
PTB es la Producción Teórica de Biomasa

RP es el Rendimiento Promedio de Bio-oil o Biochar

Localización de la planta

Para el estudio de localización de la planta de pirólisis se utilizó el método cualitativo de matriz de puntos, que se basa en establecer elementos decisivos de una ubicación, asignándole cifras equilibradas de peso, teniendo en cuenta la significancia que se le atribuye⁷. Para ello se fijaron tres localizaciones posibles en una matriz, considerando información proporcionada de las zonas a estudiar. En la Figura 3 se muestra los 3 puntos que se consideraron para esta investigación, en base a la superficie cultivada de banano, debido a que esta es mayor en comparación con la superficie cultivada de arroz.

Figura 3: Ubicación de los tres puntos referentes para la instalación de la planta.



El Punto 1 está situado en El Guabo, con una población de 50009 habitantes, su ubicación geográfica es al noroeste de la Provincia, cuenta con una superficie de 498km², a 18 km de la ciudad de Machala. Posee ríos como Pagua, Río Bonito, Jubones, El Zapote, las Minas y esteros en la zona de Tendales, debido a ello es óptimo para la agricultura. Energía eléctrica a valores considerables y óptimas vías de acceso

El Punto 2 está situado en El Cambio, ubicada en el cantón Machala, Provincia de El Oro y posee óptimas vías de acceso. Mientras que, el Punto 3 está situado en La Parroquia El Retiro; Vía Machala-Santa Rosa, con una Población 4 367 habitantes. Su ubicación geográfica es el sector meridional de la ciudad de Machala, cuenta con una superficie de 127km², ubicada a 17,5 km de

la ciudad de Machala. Posee ríos alejados como el Río Motuche y el Balneario Edén. Es óptimo para el desarrollo de la actividad agrícola. Costo de Energía eléctrica reducido y óptima vías de acceso. Todos los puntos cuentan con estacionamiento de Energía Eléctrica y acceso a la materia prima por lo que están con capacidad para el emplazamiento de la planta. Con el fin de conseguir sustentabilidad económica en la región, se insertaron restricciones en el análisis: la zona de recolección debe tener una radio mínimo de 10 km y su localización debe estar lo más alejada a ríos, parques, lugares turísticos y centros poblados.

A fin de encontrar la localización óptima, en la Tabla 1 se muestran los criterios que predominan en la selección del mismo, por lo que los tres puntos seleccionados fueron valorados mediante un sistema de calificación de 1 a 10, con su respectiva ponderación.

Tabla 1: Factores para la determinación de localización.

Factores	Peso
Factores Impredecibles	70
Energía Eléctrica	15
Abastecimiento de Materia Prima	20
Facilidad de vías de acceso	12
Agua	9
Transporte	14
Factores Importantes	20
Costo del suelo	5
Infraestructura	4
Mano de obra	4
Costo de mantenimiento	3
Distancia a zonas pobladas	2
Comunicación	2
Factores Adicionales	10
Combustibles	5
Consideraciones legales	5
Total	100

Resultados y discusión

Producción total de residuos lignocelulósicos

De acuerdo a la ESPAC 2020, la superficie cultivada de banano y arroz en la provincia de El Oro en el año 2019 fue de 45 801 ha y 4 946 ha, respectivamente⁸. Por lo que se aprecia un aumento de superficie cultivada con respecto al año 2015 para ambos cultivos, y así mismo un aumento

en la generación de residuos agrícolas de este tipo. Los residuos lignocelulósicos del cultivo de arroz están compuestos principalmente por cascarillas de arroz y los del banano por restos de pseudotallo, hojas y bananas rechazadas⁹. Por otra parte, los valores que se detallan en la Tabla 2 son los parámetros de los residuos lignocelulósicos de banano y arroz, a los cuales se les realiza análisis extractivos (celulosa, hemicelulosa, lignina), proximal (ceniza, humedad, poder calorífico), elemental (C, H, N, S), los análisis de estos constituyentes se los hace con el fin de conocer las características y la eficiencia de estos residuos para la producción de bio-oil y biochar utilizando pirólisis rápida. Un ejemplo claro son los resultados del poder calorífico, que entre menor sea su valor mayor será el rendimiento de energía que va a generar uno de estos residuos, entre los residuos que contienen menor poder calorífico está el raquis de banano con un valor de 12 213 KJ/Kg, lo cual quiere decir que como materia prima se podrá llegar a producir mayores cantidades de bio-oil y biochar, comparados con los otros residuos.

Tabla 2: Parámetros de los Residuos de Banano y Arroz

Parámetros	Residuos de Banano			Residuo de Arroz
	Raquis	Hoja	Pseudotallo	Cascarilla
Celulosa(%) ¹⁰	73,5	36,3	35,3	34,4
Hemicelulosa(%) ¹¹	6-8	27,39	24,9	-
Lignina(%) ¹¹	12,99	8,5	5,2	19,0-20,6
Ceniza(%) ¹¹	8,0	12,82	13,69-18,66	17,8-18,45
Humedad(%) ¹²	8,7	2,03	2,47-4,7	8,78-8,9
Carbono (%) ¹²	36,63	44,98	38,30	39,1
Hidrógeno (%) ¹³	5,10	4,26	3,88-4,70	5,2
Nitrógeno (%) ¹³	0,64	2,20	0,03-0,28	0,25
Azufre (%) ¹³	0,75	0,64	0,58-0,84	0,43
Poder Calorífico (KJ/Kg) ¹⁴	12 213	17 619	12 458-12 895	15 275

Para la producción teórica de biomasa se consideró la relación residuo / producto es decir 20 y 6,6 toneladas de residuos por hectáreas cultivada de banano y arroz en la provincia de El Oro¹⁴,

respectivamente, obteniéndose que la producción de residuos de banano es de 916 020 ton y los residuos de arroz tiene una producción de 32 789 ton.

Producción potencial de biomasa, bio-oil y biochar

En la Tabla 3 se muestra los rendimientos obtenidos por diversos autores, de tal forma que se obtuvo dos porcentajes para cada producto, puesto que este depende de la cantidad de biomasa que se emplea como materia prima. Por lo tanto, con un rendimiento de 50% de bio-oil para el banano y arroz se obtuvo una producción potencial de 458 010 y 16 394 ton respectivamente y con un porcentaje de 75% de bio-oil se produce 687 015 ton para el banano y 24 592 ton para el arroz en generación de bio-oil. Así mismo, en la producción potencial de Biochar se obtuvo que con un rendimiento de 12% se produce 109 922 ton en el caso del banano y 3 934 ton el arroz, pero si el rendimiento aumenta a un 20% se tiene que generaría un total de 183 204 ton y 6558 ton de biochar con respecto a los residuos de banano y arroz. Estas cantidades considerables de bio-oil y biochar pueden tener diversas aplicaciones generando ingresos económicos. El bio-oil posee varias aplicaciones en el campo de la energía y los combustibles, puede utilizarse como precursor de otros compuestos químicos y para aplicaciones en calderas, hornos, turbinas y motores para la generación de calor, electricidad y/o vapor, así como también como combustible para vehículos de transporte¹⁵. Mientras que, el biochar es principalmente utilizado en la agricultura para la mejora de las características fisicoquímicas del suelo, incluyendo la fertilidad^{16,17}.

Tabla 3: Valores de producción potencial de bio-oil y biochar para cada tipo de cultivo

Tipo cultivo	Superficie cultivada (ha)	Potencial Teórico de Biomasa (ton)	Rendimiento en bio-oil (%)	Producción potencial de bio-oil (ton)	Rendimiento en biochar (%)	Producción potencial de biochar (ton)
Banano	45 801 ⁸	916 020	50 ⁵	458 010	12 ⁵	109 922
			75 ¹⁸	687 015	20 ¹⁸	183 204
Arroz	4 946 ⁸	32 789	50 ⁵	16 394	12 ⁵	3 934
			75 ¹⁸	24 592	20 ¹⁸	6558

Localización de la planta

Los resultados de la Tabla 4 reflejan que la zona adecuada para la instalación de la planta es el punto 3, correspondiente a la Parroquia El Retiro, puesto que cumple con los factores de

evaluación para su estudio en función de la superficie cultivada de banano, debido a que la proporción con respecto al arroz es mucho mayor. La parroquia El Retiro está ubicada en la zona meridional de la Ciudad de Machala, cuenta con todos los servicios básicos necesarios para la construcción de la infraestructura, las vías de acceso conectan a diferentes puntos de la Provincia para el abastecimiento de la biomasa, al Norte enlaza con el cantón Machala y el Guabo y al Sur con el cantón Santa Rosa, las vías habilitadas permiten la fácil recolección y transporte del centro de acopio hasta la planta de pirólisis.

Tabla 4: Matriz de decisión para la selección de la localización.

Factor	Peso	Punto 1		Punto 2		Punto 3	
		Ponderación	Calificación	Ponderación	Calificación	Ponderación	Calificación
Costo de Energía	15	6	90	1	15	10	150
Abastecimiento de Materia Prima	20	7	140	5	100	8	160
Costo de transporte	14	8	112	4	56	9	126
Vías de acceso	12	8	96	4	48	8	96
Agua	9	6	54	6	54	8	72
Infraestructura	4	5	20	6	24	6	24
Mano de obra	4	6	24	3	12	6	24
Costo del suelo	5	5	25	6	30	8	40
Costo de mantenimiento	3	10	30	5	15	10	30
Distancia a zonas pobladas	2	7	14	2	4	8	16
Comunicación	2	6	12	8	16	6	12
Combustibles	5	5	25	4	20	6	30
Consideraciones legales	5	6	30	7	35	8	40
Total	100		672		429		820

Por otra parte, los costos de suelo y mano de obra son menores en la Parroquia El retiro, por lo que es más viable económicamente esta zona. Así mismo, al ser una parroquia pequeña con una distante población de 4367 habitantes, que se dedica principalmente al cultivo de banano

favorece a los factores de abastecimiento de materia prima y distancia a zonas pobladas. El éxito de la localización de la planta para la obtención de biocombustibles está sujeto a la disposición y abastecimiento permanente de la materia prima.

Conclusiones

La producción potencial de bio-oil a partir de la pirólisis de residuos de banano y arroz resultó ser de 458 010 ton/año y 16 394 ton/año respectivamente para un rendimiento promedio del 50% reportado en la literatura para la mayoría de matrices de origen vegetal. Por su parte, con respecto al biochar, para un rendimiento promedio del 12%, la producción potencial es de 109 922 ton/año para residuos de banano y 3 934 ton/año para residuos lignocelulósicos provenientes de cultivos de arroz.

Por otra parte, la localización óptima para la planta es en la parroquia El Retiro, debido a cuenta con todos los servicios básicos necesarios para la construcción de la infraestructura, las vías de acceso conectan a diferentes puntos de la provincia para el abastecimiento de la biomasa permitiendo la fácil recolección y transporte del centro de acopio hasta la planta.

Referencias

1. Can, Ü. Chemical Composition Analysis of Agroindustrial Waste and Their Potential Usage in Bio-Ethanol Production. 2011.
2. Redondo-Gómez, C.; Rodríguez, M.; Vallejo, S.; Murillo, J.; Lopreti, M.; Vega, J. Biorefinery of Biomass of Agro-Industrial Banana. *J. Mol.* 2020, 25, 1–13. <https://doi.org/https://doi.org/10.3390/molecules25173829>.
3. Mejías-Brizuela, N.; Orozco-Guillen, E.; Galaán-Hernández, N. Aprovechamiento de Los Residuos Agroindustriales y Su Contribución Al Desarrollo Sostenible de México. *Rev. Ciencias Ambient. y Recur. Nat.* 2016, 2 (6), 27–41.
4. Guerrero, A.; Aguado, P.; Sánchez, J. GIS- Based Assessment of Banana Residual Potencial for Ethanol Production and Power Generation: A Case Study. *Waste Biomass Valor* 2016, 7, 4005–4415.
5. Sellin, N.; Krohl, D. R.; Marangoni, C.; Souza, O. Oxidative Fast Pyrolysis of Banana Leaves in Fluidized Bed Reactor. *Renew. Energy* 2016, 96, 56–64. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2016.04.032>.
6. Castells, X. E.; García, E. V. *La Pirolisis: Tratamiento y Valorizacion Energética de Residuos*. Ediciones Díaz de Santos. 2012.

7. Escudero, C.; Cortez, L. *Técnicas y Métodos Cualitativos Para La Investigación Científica*; 2018; Vol. 53.
8. ESPAC. *Encuesta de Superficie y Producción Agropecuaria Continua (ESPAC) 2019; 2020.*
9. Roca-Pérez, L.; León, D.; Valdemar, J.; Hernández, R. B. Aprovechamiento de Residuos Orgánicos En Distintos Cultivos de Ecuador. *Rev. Científica Investig. Docencia y Proyección Soc.* 2017, 16, 84–95.
10. Aguilar, D. A. Determinación Del Potencial Energético de La Biomasa Residual de Cultivos de Banano En El Cantón Machala, El Oro, Ecuador. *Univ. Politec. Sales.* 2019, 1–45.
11. Palacios, M. *Caracterización Química de La Biomasa Procedente de Las Hojas, Pseudotallo, Raquis y Pseudopeciolo de La Planta de Banano y Su Relación Con El Poder Calorífico*, 2016. <https://doi.org/10.1002/adma.201704028>.
12. Prada, A.; Cortés, C. E. La Descomposición Térmica de La Cascarilla de Arroz : Una Alternativa de Aprovechamiento Integral. *Rev. ORINOQUIA* 2010, 14 (1), 155–170.
13. de Souza, H.; Chaves, M.; Vidaurre, G.; Andrade, C.; Carneiro, A.; de Souza, D.; Protásio, T. Pelletization of Eucalyptus Wood and Coffee Growing Wastes: Strategies for Biomass Valorization and Sustainable Bioenergy Production. *Renew. Energy* 2020, 149, 128–140. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.12.015>.
14. Abdullah, N.; Sulaiman, F.; Taib, R. M. Characterization of Banana (*Musa Spp.*) Plantation Wastes as a Potential Renewable Energy Source. *AIP Conf. Proc.* 2013, 1528, 325–330. <https://doi.org/10.1063/1.4803618>.
15. Arteaga, J.; Arenas, E.; López, D.; Sánchez, C.; Zapata, Z. Obtención de Biocombustibles Producto de La Pirólisis Rápida de Residuos de Palma Africana (*Elaeis Guineensis Jacq.*). *Biotechnol. en El Sect. Agropecu. y Agroindustrial* 2012, 10 (2), 144–151.
16. Milesi, L.; Ullé, J.; Andriulo, A. Aplicación de Biochar En Un Suelo Degradado Bajo Producción de Batata. Efecto Sobre Propiedades Edáficas. *Cienc. del suelo* 2020, 38 (1), 162–173.
17. Sánchez-Reinoso, A.; Ávila-Pedraza, E.; Restrepo-Díaz, H. Use of Biochar in Agriculture. *Acta Biol. Colomb.* 2020, 25 (2), 327–338. <https://doi.org/10.15446/abc.v25n2.79466>.
18. Klug, M. Pirólisis, Un Proceso Para Derretir La Biomasa. *Revista De Química*, 26(1-2), 37-40. *Rev. Quim.* 2012, 26, 1–4.