

DISPONIBILIDAD DE BIOMASA PARA UNA BIORREFINERÍA DE PEQUEÑA ESCALA. UN CASO DE ESTUDIO BASADO EN SIG

MARÍA ANTONIETA RIERA

<https://orcid.org/0000-0002-7195-2821>

Universidad Técnica de Manabí, Facultad de Ingeniería, Portoviejo, Ecuador

RICARDO RAÚL PALMA

<https://orcid.org/0000-0002-1864-7625>

Universidad Nacional de Cuyo, Facultad de Ingeniería, Mendoza, Argentina

Recibido: 1 de junio del 2021 / Aprobado: 21 de junio del 2021

doi: <https://doi.org/10.26439/ing.ind2022.n.5815>

RESUMEN. En esta ocasión, se estimó la cantidad de residuos agrícolas que puede ser usada como materia prima en una biorrefinería. Se tomó como caso de estudio el país Ecuador, porque tiene gran actividad de este tipo. Se construyó una serie de tiempo para la producción agrícola anual empleando el modelo ARIMA por medio del *software* RStudio. Para los principales cultivos, se estimó la cantidad de residuos generados y, después, se realizó un análisis de redes vectoriales a través del *software* GRASS GIS. Los resultados indicaron que la principal fuente aparente de residuos es el banano, del cual se obtendrían hojas, cáscara, raquis y vástago, útiles en la elaboración de bioproductos. Con el uso del SIG se determinó que la mayor cantidad de cultivos se encuentran en dos regiones del país, con distancias superiores a 500 metros respecto a la red vial. Las características de Ecuador posibilitan la instalación futura de biorrefinerías de pequeña escala en el país.

PALABRAS CLAVE: biorrefinerías / residuos agrícolas / plátanos / sistemas de información geográfica

Correos electrónicos en orden de aparición: maria.riera@utm.edu.ec, rpalma@uncu.edu.ar

BIOMASS AVAILABILITY FOR A SMALL-SCALE BIOREFINERY. A CASE STUDY BASED ON GIS

ABSTRACT. On this occasion, the amount of agricultural waste was estimated, to be used as raw material in a biorefinery. The country Ecuador was taken as a case study, as it is a country with great activity of this type. A time series for annual agricultural production was constructed using the ARIMA model through RStudio software. For the main crops, the number of residues generated was estimated and after that, an analysis of vector networks was carried out through the GRASS GIS software. The results indicated that the main apparent source of waste is the banana, from which leaves, peel, rachis, and stem would be obtained, useful in the production of bioproducts. Using the GIS, it was determined that the largest number of crops are found in two regions of the country, with distances greater than 500 meters from the road network. The characteristics of Ecuador make possible the future installation of small-scale biorefineries in the country.

KEYWORDS: bio-refineries / agricultural wastes / bananas / geographic information systems

INTRODUCCIÓN

Los sistemas de información geográfica (SIG) son una técnica geomática especializada que permite gestionar y analizar la información espacial para resolver problemas frecuentemente relacionados con la geografía y la distribución espacial (Bansal & Pal, 2006). La ubicación de biomasa disponible para la instalación de una biorrefinería es un campo que en los últimos años emplea los SIG como herramienta de apoyo. Su uso integrado con herramientas de toma de decisión ha intervenido en el desarrollo de una metodología para planificar la ubicación óptima de plantas de biomasa (Jeong & Ramírez-Gómez, 2018).

La instalación de una biorrefinería implica una gran inversión, por lo que se requiere un análisis cuidadoso de su ubicación, que considere la selección de cultivos y biomasa de los campos circundantes. Algunos factores que pueden influir en la decisión de una instalación son el costo de transporte, el costo de inventario y pérdida. Las incertidumbres en la ubicación de la biorrefinería provienen principalmente de la posible falta de biomasa, que es un aspecto crítico para el funcionamiento de una biorrefinería, porque depende del clima y es muy estacional; por otra parte, se encuentra la volatilidad de los precios, que resulta determinante para seleccionar la biomasa que se va a utilizar (Serrano-Hernández et al., 2021).

Se considera biomasa a cualquier material orgánico (vivo o residual) proveniente de plantas, árboles, algas, organismos marinos, microorganismos o animales, que pueden someterse a tratamientos físicos, químicos, biológicos o a una combinación de estos (Fantini, 2017; Lewandowski et al., 2018). La biomasa se clasifica según su origen en cultivos energéticos, residuos agroindustriales, residuos de poda de árboles y residuos municipales e industriales. De acuerdo con su generación, pueden ser de primera, segunda o tercera. Los de primera generación son los cultivos energéticos o aquellos destinados a la alimentación humana. Los de segunda generación comprenden la fracción biodegradable de productos, desechos y residuos de la agricultura, silvicultura, ganadería, crianza e industrias relacionadas, así como la fracción de residuos municipales e industriales (Aristizábal-Alzate et al., 2020). La tercera generación de biomasa corresponde a las macroalgas y microalgas (Hong & Wu, 2020; Siqueira et al., 2016).

Los residuos agroindustriales incluyen los provenientes de la agricultura y los generados en la industria como resultado de la transformación de la materia prima. Entre los primeros se encuentran los residuos del campo y del preprocesamiento del cultivo, constituidos en su mayoría por celulosa, hemicelulosa y lignina (Mehariya et al., 2020), útiles para la producción de bioplásticos, biocombustibles, biofertilizantes, entre otros. Este tipo de residuo es una fuente potencial especialmente para la instalación de biorrefinerías de pequeña escala, las cuales son industrias ubicadas por lo general en áreas rurales, para el aprovechamiento simultáneo de los residuos de la agroindustria

(Gómez-Soto et al., 2019). Estas tienen el potencial de utilizar los recursos locales disponibles e involucrar a las partes interesadas para el desarrollo conjunto y el despliegue del mercado (De Visser & Van Ree, 2016).

Existen algunas experiencias de integración de este tipo en Latinoamérica. En Colombia, por ejemplo, desde el 2006 se desarrolla el proyecto Biorrefinerías Rurales Sociales (Birus), que busca promover el desarrollo rural en comunidades de pocos recursos, para lo cual propone la producción y utilización de etanol hidratado, usando como materia prima los cultivos de yuca, batata y sorgo dulce. Un caso similar se presenta en Panamá, donde a través de una cooperativa se emplean los desechos orgánicos de fincas lecheras y porquerizas de zonas rurales para construir pequeñas cocinas a biogás producido en biodigestores instalados en dichas fincas. Proyectos similares existen en Brasil, orientados a potenciar la producción de energía a pequeña escala, ya sea en tierras marginales en asociación con cultivos de alimentos o en tierras áridas del país (Trigo et al., 2014).

Las biorrefinerías constituyen una gran oportunidad, particularmente en los países en vías de desarrollo y con vocación agrícola, donde la agricultura es una porción importante de la economía y la sociedad (Bisang & Trigo, 2017). Un país en el que podría aplicarse este tipo de negocios es Ecuador, pues se caracteriza por poseer una economía primaria que depende en gran medida de la producción agrícola (Arévalo-Luna, 2014). En el año 2019, se reportaron 1 439 504 hectáreas (ha) sembradas con cultivos permanentes y 769 708 ha ocupadas por cultivos transitorios y barbechos (Instituto Nacional de Estadística y Censos [INEC], 2020), donde destaca con mayor producción la caña de azúcar (para azúcar), además del banano, el maíz duro seco y el arroz en cáscara (Ministerio de Agricultura y Ganadería [MAG], 2020a).

Toda esta labor agrícola genera residuos que, por lo general, son destinados a la alimentación animal, o son quemados, o simplemente no aprovechados (Riera et al., 2019). La presencia de metabolitos primarios y secundarios entre los constituyentes de estos recursos posibilita su uso en la cadena de suministros de una biorrefinería de pequeña escala, cuya motivación principal es la reutilización local de materiales, minimizando los costos de reciclaje y transporte (Bruins & Sanders, 2012). La biomasa residual se caracteriza por tener un costo relativamente bajo si se compara con el ocasionado por la recolección, el transporte y el procesamiento respectivo (Obi et al., 2016), razón por la cual es necesario optimizar los tiempos de entrega, diseño de rutas, selección de flota, transportadores y programación de despachos (Salas-Navarro et al., 2019).

El uso de residuos agrícolas como materia prima para una biorrefinería puede apoyarse en el análisis de datos geoespaciales para evaluar la ubicación de cultivos y áreas potencialmente cultivadas, así como la logística necesaria para determinar requerimientos de transporte y almacenamiento (Dragone et al., 2020). El análisis de datos

geoespaciales se utiliza en proyectos para la ubicación de biomásas residuales con fines energéticos. Tal es el caso de una investigación realizada en Bolivia, donde se aplicó en un entorno de sistemas de información geográfica para localizar puntos de recolección de biomasa agrícola, que se convertiría en fuente de energía renovable. Así, se podría expandir el uso de biomasa en el sector energético de dicho país (Morato et al., 2019).

En España se empleó un enfoque de SIG basado completamente en *software* de código abierto para la gestión de los residuos de olivares como una opción válida de biocombustible sólido para la producción de energía en la región (Latterini et al., 2020). En un trabajo similar desarrollado en México, se usó una herramienta basada en sistemas de información geográfica con el fin de involucrar restricciones ambientales, sociales y geográficas para determinar, a través de datos históricos de disponibilidad de biomasa residual, regiones viables para ubicar instalaciones de sistemas para su procesamiento (Santibáñez-Aguilar et al., 2018).

En este sentido, el presente trabajo tiene como propósito estimar la cantidad de biomasa disponible proveniente de los residuos agrícolas e identificar los puntos de generación, con el fin de facilitar la instalación de biorrefinerías de pequeña escala, teniendo en cuenta los canales de acceso y la distribución de biomasa. A tal efecto, se describe a continuación la metodología empleada, los resultados obtenidos y las respectivas conclusiones.

METODOLOGÍA

Identificación de rubros cultivables

Se consultó en el Sistema de Información Agropecuaria del Ministerio de Agricultura y Ganadería (INEC, 2020; MAG, 2021b) las cifras agroproductivas del país para los últimos cinco años. La información procesada permitió identificar los rubros con mayor producción y rendimiento, considerándolos como posibles materias primas para una biorrefinería de pequeña escala.

Estimación de la producción agrícola

En esta etapa, se consultó la producción de los principales cultivos del país desde el año 1961 hasta el año 2019. Para ello, se emplearon dos fuentes: la información oficial reportada por la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y Agricultura (FAO) sobre la producción agrícola de Ecuador desde 1961 al 2001 (FAO, 2018), y el registro actualizado hasta mayo del 2020 del Ministerio de Agricultura y Ganadería del país, que contiene los datos del INEC para la Encuesta de Superficie y Producción Agropecuaria Continua (ESPAC) de los años 2002 al 2020 (MAG, 2021a).

En el periodo evaluado, se destacan los eventos climáticos de El Niño de 1982-1983, 1997-1998 y en años posteriores, que causaron daños significativos a la agricultura de Ecuador. De igual modo, el incremento en la temperatura y las variaciones en el nivel de precipitaciones como consecuencia del cambio climático han afectado a la actividad agrícola en algunas zonas del país (CEPAL, 2012; Toulkeridis et al., 2020).

Los datos respectivos fueron sometidos a un análisis exploratorio. Luego fueron convertidos a estacionarios y transformados con el propósito de eliminar la tendencia, de modo que pudieran ser tratados y utilizados para estimar la producción de los cinco años siguientes (2021-2025) usando el método ARIMA.

El pronóstico se hizo a través del método de media móvil integrada autorregresiva (ARIMA, por sus siglas en inglés), que se usa para explicar el comportamiento de una serie de tiempo no estacionaria, asumiendo que alguna diferencia adecuada del proceso es estacionaria; este método es de fundamental importancia para la predicción y el control de procesos de este tipo (Box et al., 2016). Los modelos ARIMA combinan tres tipos de procesos: autorregresión (AR), diferenciación para modelar la integración de la serie (I) y media móvil (MA). Se describe en términos de (p, d, q) , donde p , d y q son parámetros que toman valores enteros no negativos y representan el orden del componente autorregresivo, el grado de diferenciación para la estacionariedad y el orden del componente de la media móvil, respectivamente (Gras, 2001). De acuerdo con Box et al. (2016), la forma general del modelo ARIMA (p, d, q) se expresa según las ecuaciones 1 y 2:

$$(1 - \phi_1 B - \phi_2 B^2 - \dots - \phi_p B^p)(1 - B)^d z_t = (1 + \theta_1 B + \theta_2 B^2 + \dots + \theta_q B^q) a_t \quad (1)$$

$$\varphi(B) z_t = \phi_p(B) \nabla^d z_t = \theta_0 + \theta_q \quad (2)$$

Donde: $\nabla = (1 - B)$, B es el operador retardo, a^t es la perturbación aleatoria, $\phi_p(B)$ es un polinomio de orden p en B con parámetros ϕ_i , y $\theta_q(B)$ es un polinomio de orden q en B con parámetros θ_i . Además, $\phi(B)$ es el operador autorregresivo (que se asume estacionario); es decir, las raíces de $\phi(B) = 0$ se encuentran fuera del círculo unitario. $\varphi(B) = \phi(B) \nabla^d$ es el operador autorregresivo generalizado, no estacionario con d de las raíces de $\varphi(B) = 0$ igual a la unidad, quedando d raíces unitarias. Por último, $\theta(B)$ es el operador promedio móvil que se supone que es invertible, de modo que las raíces de $\theta(B) = 0$ se encuentran fuera del círculo unitario.

La aplicación de ARIMA requiere que las series de tiempo sean estacionarias y no exista tendencia en varianza. El método comienza con un análisis inicial de los datos, basado en un análisis gráfico de la serie de tiempo y en la evaluación de su autocorrelación.

Luego se estiman los parámetros en el modelo considerado tentativamente y se ajusta. El modelo está ajustado correctamente si los residuales son pequeños, están distribuidos aleatoriamente y no contienen información útil. Si el modelo especificado no es satisfactorio, el proceso se repite mediante un nuevo modelo diseñado para mejorar el planteado inicialmente. Este procedimiento se repite de manera iterativa hasta que se encuentra un procedimiento satisfactorio (Hanke & Wichern, 2010).

La librería *forecast* del *software* RStudio dispone de algoritmos de pronóstico automático para series de tiempo univariadas. La función *auto.arima* realiza la elección del orden del modelo (p, d, q) utilizando pruebas de raíz unitaria y el criterio de información de Akaike (AIC), expresado según la ecuación 3, el cual es un estimador que predice el error relativo de la calidad de un modelo desarrollado para un conjunto de datos (Hyndman & Khandakar, 2008).

$$AIC = L * (\hat{\theta}, \hat{x}_0) + 2q \quad L * (\hat{\theta}, \hat{x}_0) + 2q \quad (3)$$

Donde: q es el número de parámetros en θ más el número de valores libres en x_0 , y tanto $\hat{\theta}$ como $\hat{x}_0$ denotan las estimaciones de θ y x_0 . El AIC puede seleccionar entre los tipos de error cuadrático medio (MSE) o el error porcentual absoluto medio (MAPE), dado que se basa en la probabilidad más que en los pronósticos de un paso. Finalmente, se selecciona el modelo que minimiza el AIC entre todos los que son apropiados para los datos (Hyndman & Khandakar, 2008).

Estimación de biomasa disponible

Los residuos agrícolas pueden ser utilizados para la producción de moléculas plataforma (*chemical building-block*), que luego pueden ser convertidas en productos químicos intermedios o productos finales (Chávez-Sifontes, 2020), tales como biopolímeros, biofertilizantes, biofibras, biocombustibles, entre otros de valor agregado.

Para los cultivos con mayor producción estimada, se determinó la cantidad de biomasa disponible por concepto de residuos provenientes de la actividad agrícola. Para ello, se utilizó la tasa de generación de residuos (RGR) de cada producto agrícola, reportada por algunos autores en investigaciones afines (véase la tabla 1). La RGR se define como la relación —en base seca— entre el peso del residuo producido y el peso total del producto principal del cultivo (Araújo et al., 2018). Luego, la cantidad de residuos por rubro se calculó usando la ecuación 3.

$$\text{Cantidad aproximada de residuos} = \text{Producción estimada} * \text{RGR} \quad (4)$$

Tabla 1
Tasa de generación de residuos

Cultivo	Residuo	RGR	Fuente
Caña de azúcar (tallo fresco)	Hojas	0,20	(Araújo et al., 2018)
	Bagazo	0,26	
Banano (fruta fresca)	Hojas de poda	0,80	(Cortés-Hernández et al., 2011; Núñez Camargo, 2012)
	Cáscara	0,25	
	Raquis	1	
	Vástago	5	
Palma aceitera (fruta fresca)	Fibras	0,14-0,15	(Koopmans & Koppejan, 1998)
	Cáscara	0,06-0,07	
	Racimos vacíos	0,23	
Arroz (en cáscara)	Cáscara	0,25	(Araújo et al., 2018)
	Paja	1,33	
Maíz duro seco (grano fresco)	Cáscara	0,22	(Araújo et al., 2018)
	Rastrojo	1,96	
	Mazorca	0,33	

La información calculada permitió identificar el cultivo con la mayor cantidad estimada de residuos.

Análisis de redes vectoriales

El análisis de redes vectoriales es una herramienta que usa datos espaciales basados en red, que incluye enrutamiento, direcciones de viaje, instalaciones más cercanas y análisis de área de servicio, lo cual permite modelar dinámicamente condiciones realistas de la red para la toma de decisiones (Bhambulkar, 2011). A partir de un SIG con esta función, es posible encontrar caminos más cortos, conexión cíclica de nodos dados, conexión óptima de los nodos de la red, subdivisión de una red en subredes y asignación de subredes para los centros más cercanos (Netele, 2004).

Se analizó la accesibilidad a los puntos de generación de biomasa en forma de residuos, procedentes de los principales cultivos identificados. Al igual que Czapiewski (2018), el estudio emplea un análisis de red que resulta en un mapa que demuestra el acceso hacia los distintos cultivos. Para ello se utilizó la información espacial publicada por el MAG para el año 2020 concerniente a la estimación de superficie sembrada para los principales cultivos identificados (MAG, 2020b), además de los datos geográficos correspondientes a la red vial estatal del país registrados en el Sistema Nacional de Información (SNI), a partir de información suministrada por el Instituto Geográfico Militar y el Ministerio de Transporte y Obras Públicas del país (SNI, 2014).

El procesamiento de los datos se realizó utilizando la herramienta vectorial de análisis de redes del *software* GRASS GIS, siguiendo el procedimiento descrito por Ciolli et al. (2009) y Zimmermann (2017). La preparación de la red se hizo con la función *v.net* de GRASS, cuya función principal es crear una red vectorial a partir de líneas vectoriales y puntos, generando nodos a partir de intersecciones en un mapa de líneas vectoriales, conectando un mapa de líneas vectoriales con un mapa de puntos y estableciendo nuevas líneas entre pares de puntos vectoriales (Blazek, 2014). Luego se utilizó la función *v.net.iso*, la cual divide una red en bandas entre isolíneas de coste, tomando la distancia desde el centro de la red. Los nodos centrales deben estar abiertos (costos ≥ 0) y los costos correspondientes se utilizan en el cálculo (Blazek et al., 2014).

Softwares utilizados

Para el procesamiento estadístico de los datos se utilizó el *software* RStudio versión 4.0.5, mientras que la información espacial se analizó usando GRASS GIS versión 7.8.5.

RESULTADOS

Rubros cultivables

En total, se identificaron 37 productos, que pueden cultivarse solos o asociados. Un cultivo es solo cuando el área está sembrada o plantada con un único tipo de cultivo, bien sea que esté en campo abierto o bajo invernadero. Por el contrario, es asociado cuando en el mismo terreno se encuentran en forma intercalada dos o más cultivos plantados. Se encontró, además, que la mayor concentración de tierras cultivadas se ubica en las regiones costa y sierra del país. Para el año 2020, como consecuencia de la pandemia del COVID-19, el INEC cambió la metodología para la recolección de los datos, por lo que no se cuenta con los registros de producción para todos los rubros producidos. A partir de los datos consultados, se conoció que los cinco cultivos con mayor producción anual registrada fueron la caña de azúcar, el banano, la palma aceitera, el arroz y el maíz duro seco (véase la tabla 2).

Tabla 2
Cultivos con mayor producción en Ecuador del 2016 al 2020

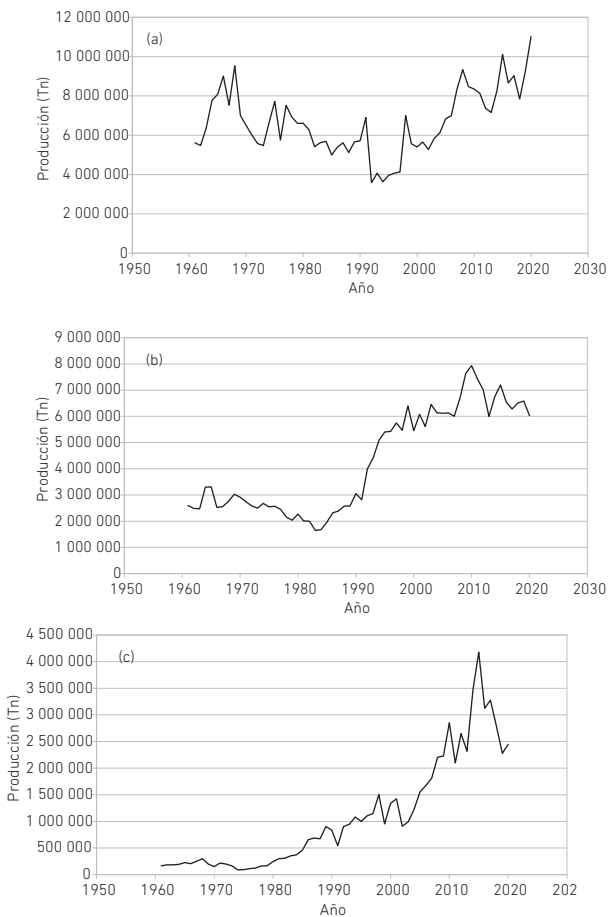
Productos	Producción anual (Tn)				
	2016	2017	2018	2019	2020
Caña de azúcar (para azúcar)	8 661 609	9 030 074	7 502 251	9 257 700	11 016 167
Banano (fruta fresca)	6 529 676	6 282 105	6 505 635	6 583 477	6 023 390
Palma aceitera (fruta fresca)	3 124 069	3 275 993	2 785 756	2 275 948	2 446 312
Arroz (en cáscara)	1 714 892	1 440 865	1 772 929	1 668 523	1 336 502
Maíz duro seco (grano seco)	1 319 379	1 474 048	1 513 635	1 801 766	1 304 884

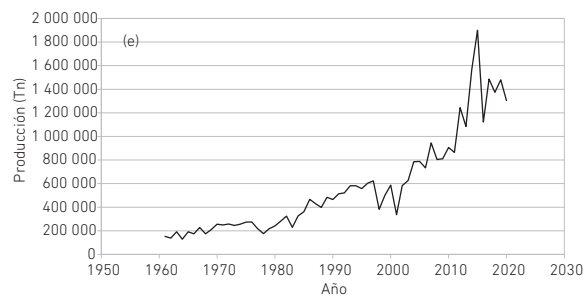
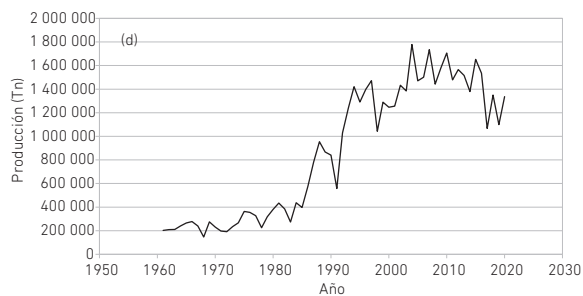
Nota. Elaborado con información tomada de MAG (2021b).

Estimación de la producción agrícola

Se comenzó con un análisis exploratorio del registro histórico para la producción de los cultivos seleccionados en la etapa anterior (véase la figura 1). En todos los rubros, se observa una tendencia creciente, lo cual sucede cuando los datos no son estacionarios. Asimismo, en los gráficos se nota una gran variabilidad en cuanto a la varianza, lo que evidencia la no estacionariedad en los datos. Para confirmar este supuesto, se realizó un test de raíces (Dickey-Fuller, aumentada), estableciéndose como hipótesis para la serie H0: no estacionaria y H1: estacionaria. Los resultados respectivos se muestran en la tabla 3.

Figura 1
Registro histórico en la producción agrícola de Ecuador





Nota. (a) Caña de azúcar. (b) Banano. (c) Palma aceitera. (d) Arroz. (e) Maíz duro seco.

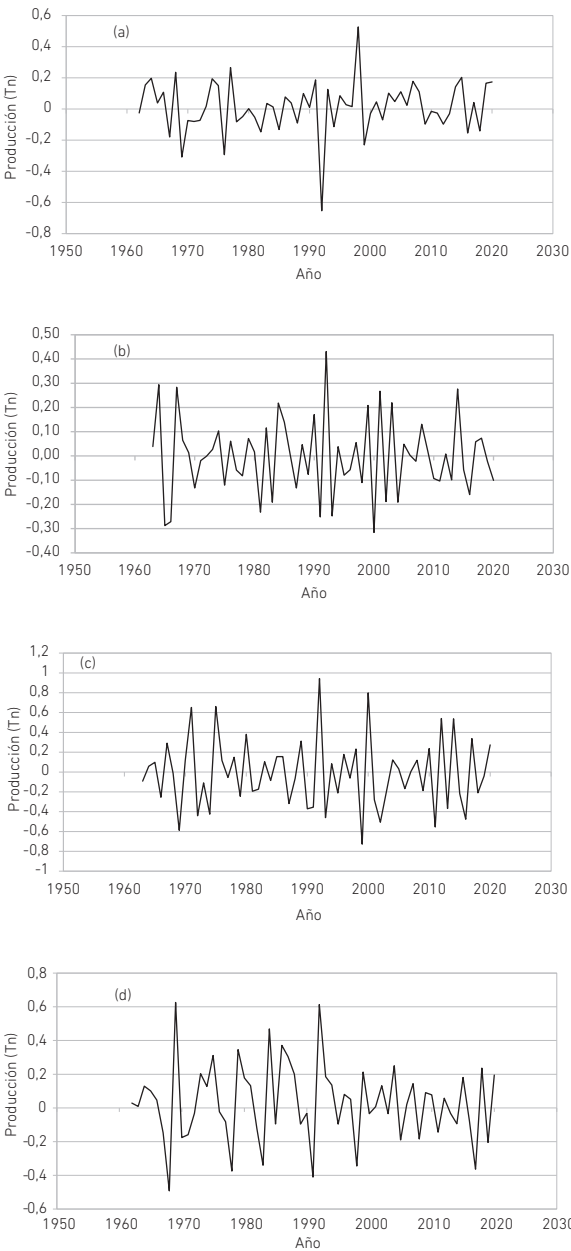
Tabla 3
Resultados del test de raíces

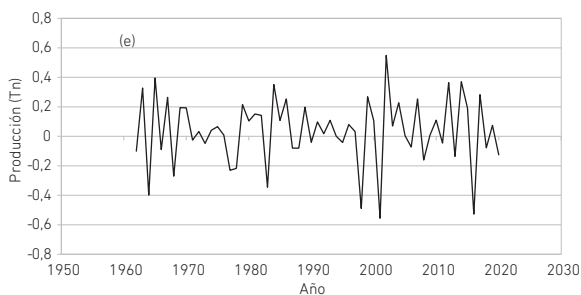
	Caña de azúcar	Banano	Palma aceitera	Arroz	Maíz duro seco
<i>p</i> -valor	0,8156	0,6706	0,3541	0,708	0,6528

Con un *p*-valor > 0,05 no rechazamos la hipótesis nula; así, confirmamos la no estacionariedad de los datos. Para convertir la serie de datos en estacionaria, se procedió a eliminar la tendencia en media con la función logarítmica y, posteriormente, fue diferenciada para eliminar la heterocedasticidad (véase la figura 2).

Figura 2

Series de datos transformadas





Nota. (a) Caña de azúcar. (b) Banano. (c) Palma aceitera. (d) Arroz. (e) Maíz duro seco.

Inicialmente, se probó transformando cada una de las series con la función logarítmica y luego diferenciándolas. La serie de datos para la producción de caña de azúcar, arroz y maíz se diferenció una vez, mientras que para el banano y la palma aceitera se diferenció dos veces. El comportamiento de la transformación $\ln(x)$, $D(-1)$, $D(-1)$ es apropiado para generar la serie, sin patrón ni tendencia, lo cual indica que la serie es estacionaria en media y varianza (Ruiz-Ramírez et al., 2011). Se aplicó nuevamente el test de Dickey-Fuller, aumentada, y con un p -valor de $0,01 < 0,05$ se comprueba la estacionariedad de los datos. Finalmente, se utilizó la función `auto.arima` de la librería `Forecast` del *software* RStudio para estimar el mejor modelo ARIMA para cada conjunto de datos (véase la tabla 4).

Tabla 4
Parámetros del modelo autorregresivo ARIMA

Cultivo	Modelo ARIMA	Coeficiente	EE	AIC
Caña de azúcar	(0, 1, 1)	-0,3020	0,1327	1807,43
Banano	(0, 1, 0)	-	-	1708,06
Palma	(0, 1, 1)	-0,2544	0,1207	1667,14
Arroz	(0, 1, 1)	-0,3883	0,1130	1590,83
Maíz duro seco	(0, 1, 1)	-0,5405	0,1059	1576,1

Nota. EE: error estándar. AIC: criterio de información de Akaike.

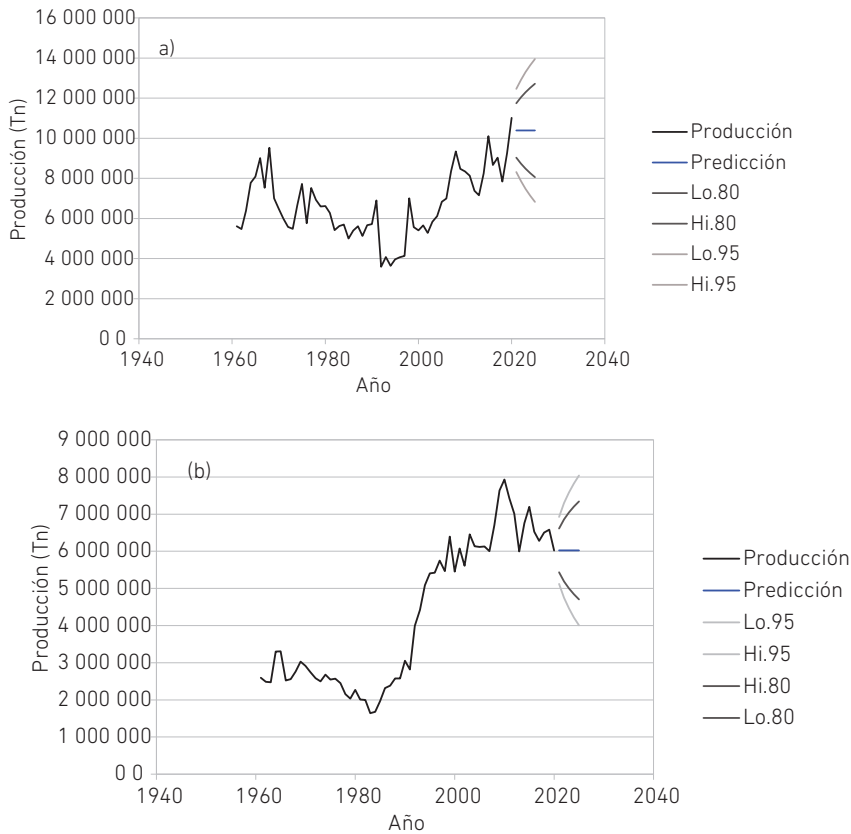
Una vez definido el mejor modelo para cada serie, se simuló la producción de cada cultivo para los próximos cinco años (véase la figura 3). Los pronósticos se muestran como una línea azul, los intervalos de predicción del 80 % como un área sombreada oscura y los intervalos de predicción del 95 % como un área sombreada clara. De acuerdo con los resultados obtenidos, se espera una producción constante para los próximos cinco años, excepto para el maíz duro seco, para el que se proyecta un crecimiento (véase la tabla

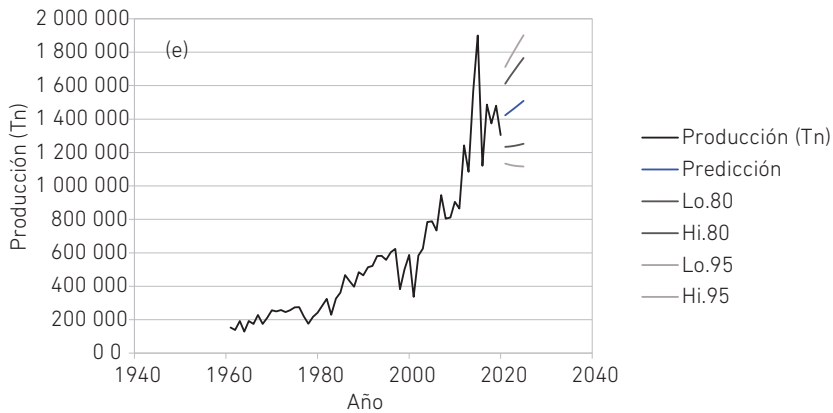
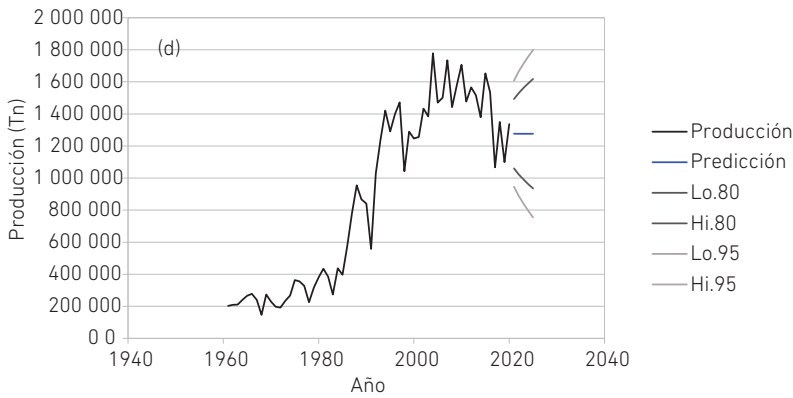
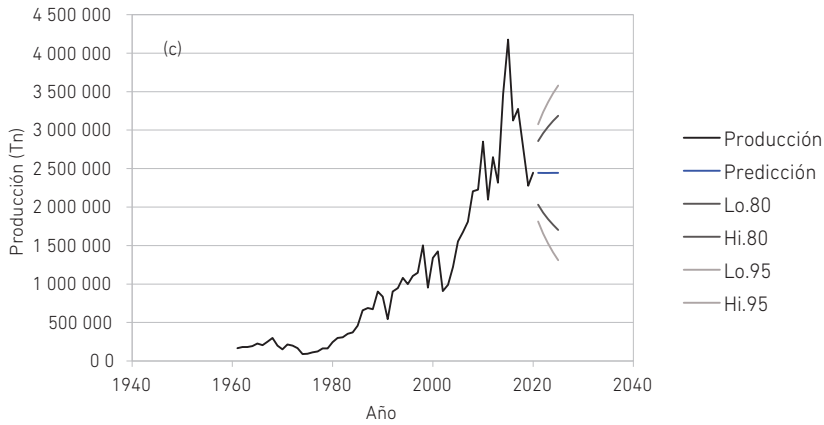
5) manteniendo la superficie actual. Los pronósticos a partir de un registro histórico según la metodología ARIMA, aunque no permiten simular un comportamiento exacto en el tiempo, son una buena herramienta para obtener niveles máximos y mínimos del evento que se evalúa (Amaris et al., 2017).

Tabla 5
Producción estimada para los próximos cinco años

Cultivo	Producción promedio estimada (Tn/año)				
	2021	2022	2023	2024	2025
Caña de azúcar	10 387 502	10 387 502	10 387 502	10 387 502	10 387 502
Banano	6 023 390	6 023 390	6 023 390	6 023 390	6 023 390
Palma	2 444 251	2 444 251	2 444 251	2 444 251	2 444 251
Arroz	1 276 654	1 276 654	1 276 654	1 276 654	1 276 654
Maíz duro seco	1 422 738	1 444 265	1 465 793	1 487 320	1 508 848

Figura 3
Estimación de cultivos producidos entre 2020 y 2025





Nota. (a) Caña de azúcar. (b) Banano. (c) Palma aceitera. (d) Arroz. (e) Maíz duro seco.

Estimación de biomasa disponible

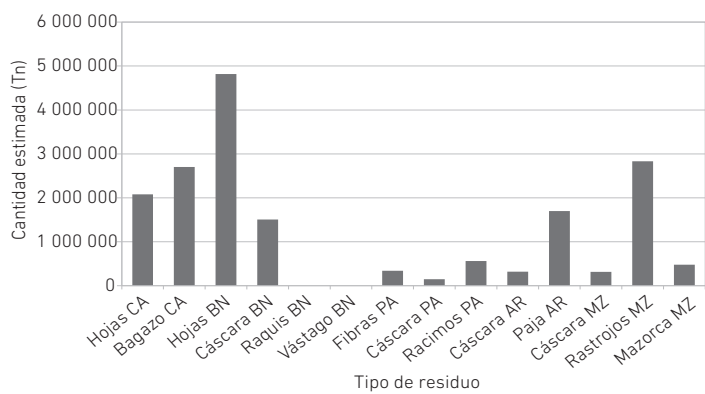
Usando la proyección de producción agrícola y el valor de RGR, se estimó la cantidad de residuos generados por año y, de este modo, se conoció la cantidad de biomasa disponible por concepto de residuos generados (véase la tabla 6).

Tabla 6
Cantidad estimada de residuos generados

Cultivo	Residuo	Cantidad de residuos generados (Tn)				
		2021	2022	2023	2024	2025
Caña de azúcar	Hojas	2 077 500	2 077 500	2 077 500	2 077 500	2 077 500
	Bagazo	2 700 751	2 700 751	2 700 751	2 700 751	2 700 751
Banano	Hojas de poda	4 818 712	4 818 712	4 818 712	4 818 712	4 818 712
	Cáscara	1 505 848	1 505 848	1 505 848	1 505 848	1 505 848
	Raquis	6 023 390	6 023 390	6 023 390	6 023 390	6 023 390
	Vástago	30 116 950	30 116 950	30 116 950	30 116 950	30 116 950
Palma aceitera	Fibras	342 195	342 195	342 195	342 195	342 195
	Cáscara	146 655	146 655	146 655	146 655	146.655
	Racimos	562 178	562 178	562 178	562 178	562 178
Arroz	Cáscara	319 164	319 164	319 164	319 164	319 164
	Paja	1 697 950	1 697 950	1 697 950	1 697 950	1 697 950
Maíz duro seco	Cáscara	313 002	313 002	313 002	313 002	313 002
	Rastrojos	2 830 759	2 872 954	2 915 147	2 957 342	2 645 428
	Mazorca	476 607	483 712	490 816	497 920	445 404

De acuerdo con esta estimación, se espera que en el año 2021 se generen cerca de 56 millones de toneladas de residuos por la actividad agrícola de la caña de azúcar, banano, palma, arroz y maíz duro seco. La mayor cantidad de residuos estaría dada por el banano, seguido de la caña de azúcar y, por último, el maíz duro seco (véase la figura 4). Aunque estos residuos representan la mayor cantidad, no se excluye el resto de los generados, puesto que todos poseen compuestos de interés para ser utilizados en una biorrefinería de pequeña escala.

Figura 4
Cantidad estimada de residuos (Tn) para el año 2021



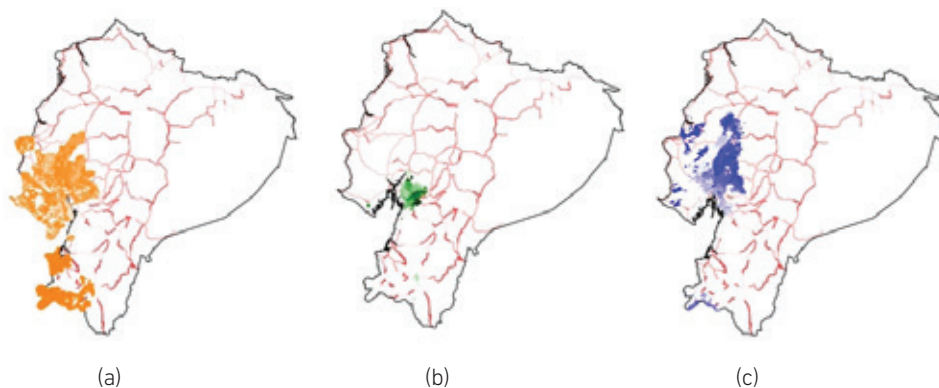
Este procedimiento también se aplicó en Brasil a partir de datos de producción agrícola entre los años 2004 y 2014. Para los principales cultivos identificados, la cantidad promedio de residuos agroindustriales disponibles se estimó en 108 millones de toneladas por año. Entre los residuos más adecuados para utilizarlos como materia prima, destacaron la paja y hojas de soya, cáscara y rastrojo de maíz, además de las hojas y el bagazo de caña de azúcar (Araújo et al., 2018).

Análisis de redes vectoriales

Para los cultivos con mayor cantidad de residuos estimados, se determinó su ubicación geográfica a partir de datos espaciales (véase la figura 5). La mayor parte de los cultivos se encuentran en la región costa del país, específicamente en las provincias de Santa Elena, Guayas, Babahoyo y El Oro. Una pequeña parte se ubica en las provincias de Loja y Bolívar de la región sierra.

Figura 5

Distribución geográfica de los cultivos

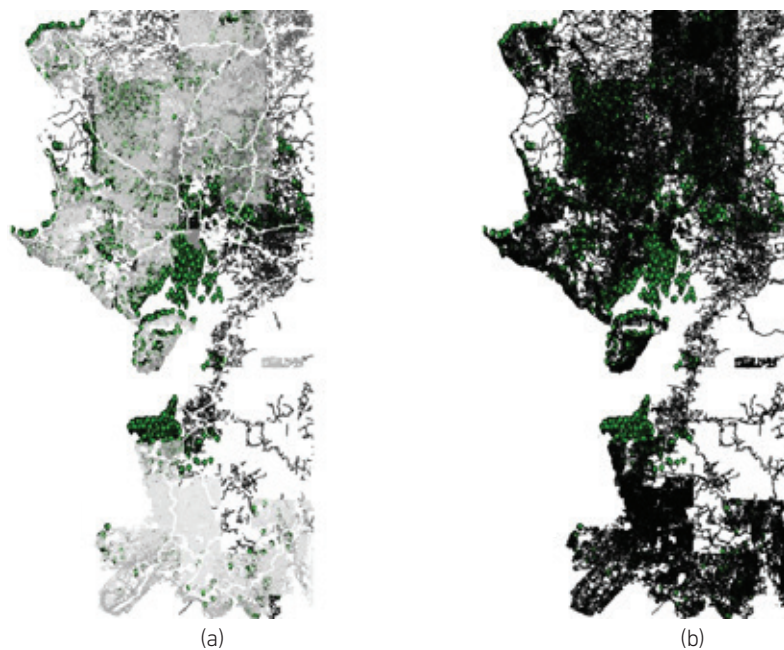


Nota. (a) Banano. (b) Caña de azúcar. (c) Maíz duro seco.

Para realizar el análisis de redes vectoriales, se seleccionó el cultivo de banano porque es el que tiene mayor extensión territorial. Se contabilizó un total de 6530 puntos correspondientes al centroide de las áreas cultivadas con este producto agrícola. Se estableció una red con el comando v.net de GRASS GIS (véase la figura 6) para conectar un total de 5377 puntos, correspondientes a los cultivos ubicados a una distancia máxima de 500 metros respecto a la red vial.

Figura 6

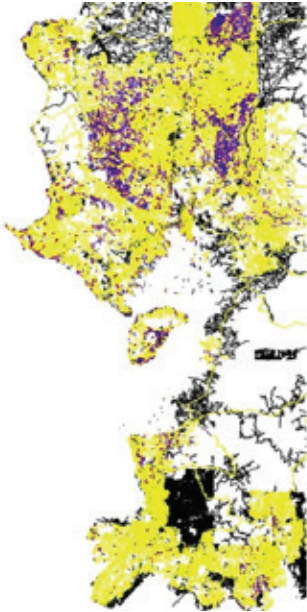
Cultivos de banana



Nota. (a) Sin conectar a la red vial. (b) Conectados a la red vial.

A continuación, se dividió el área total cultivada en subredes de igual tamaño, aplicando la distancia como parámetro de clasificación (véase la figura 7). El color azul representa los cultivos que se encuentran a una distancia de hasta 500 metros desde la red vial, el color morado indica los cultivos que están a una distancia entre 501 y 1499 metros de la red, mientras que el color amarillo muestra aquellos ubicados a distancias superiores a los 1500 metros. De acuerdo con estos resultados y considerando que la mayor cantidad de cultivos se encuentran en las provincias de Guayas y Manabí —y, por ende, es allí donde se esperaría la mayor concentración de residuos—, sería conveniente instalar en cada una de estas localidades una biorrefinería de pequeña escala. Esta es una unidad de producción capaz de hacer uso de los recursos locales, mediante unidades modulares y transportables, para la valorización eficiente y sostenible de la biomasa (De Visser & Van Ree, 2016).

Figura 7

Subredes para el cultivo de banano

Un análisis basado en la proximidad, que analiza solo las distancias, independientemente del terreno y las características de la carretera, proporciona un conocimiento limitado de los costos reales de transporte. Un análisis de la red de transporte utilizando la velocidad asociada y los límites establecidos proporciona una visión más completa de los costos de transporte (Harouff et al., 2008). En este sentido, realizar un estudio que considere los factores señalados y que, además, se lleve a cabo para cada provincia proporcionaría más información y facilitaría la toma de decisiones para una futura instalación de este tipo de bioindustrias.

DISCUSIÓN

La actividad agrícola del país muestra que la región costa tiene potencial para la instalación de biorrefinerías de pequeña escala, orientadas al aprovechamiento de los residuos provenientes de dicha labor. El cultivo con mayor cantidad estimada de residuos fue el banano, que podría utilizarse de manera integrada con otro tipo de biomasa lignocelulósica proveniente de otros cultivos para un aprovechamiento óptimo de los recursos. La implementación de un SIG facilita no solo la ubicación de los puntos de generación de residuos, sino que, además, contribuye a la determinación de costos logísticos de una biorrefinería y, a partir de este análisis, a la toma de decisiones. La distancia,

considerada como costo, permite identificar los sitios más adecuados para la instalación de un complejo industrial de este tipo, de modo que se creen redes de valor en el proceso.

Trabajos previos también han utilizado SIG para estudiar la localización de biorrefinerías. En un estudio realizado en el sur de España, se emplearon herramientas del SIG para determinar y cuantificar la biomasa procedente de campos de cultivo de olivos, almazaras e industrias extractoras de orujo de olivo, para identificar las mejores áreas disponibles para la implementación de las biorrefinerías basadas en biomasa derivada del olivo. Los resultados obtenidos mostraron tres áreas potenciales, de baja fragilidad y una alta disponibilidad de biomasa (Cardoza et al., 2021).

Del mismo modo, se visualizó la instalación de una biorrefinería en una región de Estados Unidos, a través de un sistema de información geográfica integrado con modelos de predicción de redes neuronales artificiales, considerando la evaluación de biomasa, la optimización del sitio y el modelo de costos de logística de suministro para evaluar la disponibilidad espacial y temporal de residuos de cultivos (Sahoo et al., 2016).

CONCLUSIONES

Se logró identificar los principales cultivos del país, cuyas composiciones son de interés para la producción de productos biobasados en el esquema de economía de cascada. Aunque solo se utilizó el cultivo de banano, por ser el que posee mayor cantidad de residuos aparente, todos los residuos agrícolas son una rica fuente de compuestos susceptibles de ser valorados. El análisis de redes vectoriales se realizó como una primera aproximación al proyecto de instalación de una biorrefinería orientada al procesamiento de biomasa de origen agrícola para la producción de bioproductos. La distancia existente entre los distintos puntos de generación de residuos puede representar una limitante para la implementación de biorrefinerías de pequeña escala, razón por la cual se debe profundizar en el estudio con el propósito de incorporar otras variables de interés que afecten su viabilidad. Los resultados obtenidos son una primera aproximación a la instalación de biorrefinerías de pequeña escala en Ecuador, en el marco del desarrollo bioeconómico del país. La continuación de esta investigación, considerando variables como acceso a fuentes de agua, costos de transporte y composición de los distintos residuos para un uso integrado, dará alternativas de decisión en este sector de la industria. Se busca la participación de la comunidad científica interesada en el tema presentado para ampliar la investigación.

REFERENCIAS

- Amaris, G., Ávila, H., & Guerrero, T. (2017). Aplicación de modelo ARIMA para el análisis de series de volúmenes anuales en el río Magdalena. *Tecnura*, 21(52), 88-101. http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0123-921X2017000200007
- Araújo, D. J. C., Machado, A. V., & Vilarinho, M. C. L. G. (2018). Availability and suitability of agroindustrial residues as feedstock for cellulose-based materials: Brazil case study. *Waste and Biomass Valorization*, 10(10), 2863-2878. <https://doi.org/10.1007/s12649-018-0291-0>
- Arévalo-Luna, G. A. (2014). Ecuador: economía y política de la revolución ciudadana, evaluación preliminar. *Apuntes del CENES*, 33(58), 109-134. <https://doi.org/10.19053/22565779.3104>
- Aristizábal-Alzate, C. E., Alvarado, P. N., & Vargas, A. F. (2020). Biorefinery concept applied to phytochemical extraction and bio-syngas production using agro-industrial waste biomass: a review. *Ingeniería e Investigación*, 40(2), 22-36. <http://dx.doi.org/10.15446/ing.investig.v40n2.82539>
- Bansal, V. K., & Pal, M. (2006). Los sistemas de información geográfica en la industria de construcción: una metodología para generar vistas 3-d de edificios. *Geoenseñanza*, 11(1), 17-28. <http://www.saber.ula.ve/handle/123456789/27741>
- Bhambulkar, A. V. (2011). Municipal solid waste collection routes optimized with Arc GIS network analyst. *International Journal of Advanced Engineering Sciences and Technologies*, 1(11), 202-207. <https://journals.indexcopernicus.com/search/article?articleId=536960>
- Bisang, R., & Trigo, E. (2017). *Bioeconomía argentina. Modelos de negocios para una nueva matriz productiva*. Bolsa de Cereales de Buenos Aires; Ministerio de Agroindustria de la Nación. https://www.magyp.gob.ar/sitio/areas/bioeconomia/_archivos//Modelo_de_negocios.pdf
- Blazek, R. (2014). *GRASS GIS 7.8.6dev. Reference manual*. <https://grass.osgeo.org/grass78/manuals/v.net.iso.html>
- Blazek, R., Landa, M., & Metz, M. (2014). *GRASS GIS 7.8.6dev. Reference manual*. <https://grass.osgeo.org/grass78/manuals/v.net.html>
- Box, G. E. P., Jenkins, G. M., Reinsel, G. C., & Ljung, G. M. (2016). *Time series analysis: forecasting and control* (5.ª ed.). Wiley.
- Bruins, M. E., & Sanders, J. P. M. (2012). Small-scale processing of biomass for biorefinery. *Biofuels, Bioproducts and Biorefining*, 6(2), 135-145. <https://doi.org/https://doi.org/10.1002/bbb.1319>

- Cardoza, D., Romero, I., Martínez, T., Ruiz, E., Gallego, F. J., López-Linares, J. C., Manzanares, P., & Castro, E. (2021). Location of biorefineries based on olive-derived biomass in Andalusia, Spain. *Energies*, 14(11), 3052. <https://doi.org/10.3390/en14113052>
- CEPAL. (2012). *La economía del cambio climático en el Ecuador 2012*. Naciones Unidas. https://repositorio.cepal.org/bitstream/handle/11362/35455/1/S2013300_es.pdf
- Chávez-Sifontes, M. (2020). La biomasa: fuente alternativa de combustibles y compuestos químicos. *Anales de Química*, 115(5), 399-407. <https://analesdequimica.es/index.php/AnalesQuimica/article/view/1171>
- Ciolfi, M., Tattoni, C., Zatelli, P., Vitti, A., & Zottele, F. (2009). *Advanced vector analysis. Network analysis* [Versión GRASS 6.4]. GRASS Tutorial. http://www.ing.unitn.it/~grass/docs/tutorial_64_en/htdocs/esercitazione/network_analysis/index.html
- Cortés Hernández, H. F., Martínez Yepes, P. N., Guarnizo Franco, A., & Rodríguez Espinoza, J. A. (2011). *Aprovechamiento integral de la planta del plátano*. Elizcom.
- Czapiewski, S. (2018). Accessibility of outdoor physical activity facilities in Bydgoszcz illustrated with GIS network analysis. *AIP Conference Proceedings*, 2040(1), 070013. <https://doi.org/10.1063/1.5079134>
- De Visser, C. L. M., & Van Ree, R. (2016). *Small-scale biorefining*. Wageningen University & Research. <https://library.wur.nl/WebQuery/wurpubs/512997>
- Dragone, G., Kerssemakers, A. A. J., Driessen, J. L. S. P., Yamakawa, C. K., Brumano, L. P., & Mussatto, S. I. (2020). Innovation and strategic orientations for the development of advanced biorefineries. *Bioresource Technology*, 302, 122847. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2020.122847>
- Fantini, M. (2017). Biomass availability, potential and characteristics. En M. Rabaçal, A. F. Ferreira, C. A. M. Silva & M. Costa (Eds.), *Biorefineries. Targeting energy, high value products and waste valorisation* (pp. 21-54). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-319-48288-0_2
- Gómez-Soto, J. A., Sánchez-Toro, Ó. J., & Matallana-Pérez, L. G. (2019). Urban, agricultural and livestock residues in the context of biorefineries. *Revista Facultad de Ingeniería*, 28(53), 7-32. <https://doi.org/10.19053/01211129.v28.n53.2019.9705>
- Gras, J. A. (2001). Modelos ARIMA. En J. A. Gras (Coord.), *Diseños de series temporales: técnicas de análisis* (pp. 49-80). Universitat de Barcelona, Servicio de Publicaciones.
- Hanke, J. E., & Wichern, D. W. (2010). *Pronósticos en los negocios* (9.ª ed.). Pearson.

- Harouff, S. E., Grushecky, S. T., & Spong, B. D. (2008). West Virginia forest industry transportation network analysis using GIS. En D. F. Jacobs & C. H. Michler (Eds.), *Proceedings, 16th Central Hardwood Forest Conference* (pp. 257-264). <https://www.fs.usda.gov/treearch/pubs/14029>
- Hong, Y., & Wu, Y.-R. (2020). Acidolysis as a biorefinery approach to producing advanced bioenergy from macroalgal biomass: a state-of-the-art review. *Bioresource Technology*, 318, 124080. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2020.124080>
- Hyndman, R., & Khandakar, Y. (2008). Automatic time series forecasting: the forecast package for R. *Journal of Statistical Software*, 27(3), 1-22. <http://dx.doi.org/10.18637/jss.v027.i03>
- Instituto Nacional de Estadística y Censos. (2020). *Encuesta de Superficie y Producción Agropecuaria Continua - ESPAC*. <https://www.ecuadorencifras.gob.ec/estadisticas-agropecuarias-2/>
- Jeong, J. S., & Ramírez-Gómez, Á. (2018). Optimizing the location of a biomass plant with a fuzzy-DEcision-MAking Trial and Evaluation Laboratory (F-DEMATEL) and multi-criteria spatial decision assessment for renewable energy management and long-term sustainability. *Journal of Cleaner Production*, 182(1), 509-520. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.12.072>
- Koopmans, A., & Koppejan, J. (1998). *Agricultural and forest residues. Generation, utilization and availability*. Regional Consultation on Modern Applications of Biomass Energy. <http://www.fao.org/3/AD576E/ad576e00.pdf>
- Latterini, F., Stefanoni, W., Suardi, A., Alfano, V., Bergonzoli, S., Palmieri, N., & Pari, L. (2020). A GIS approach to locate a small size biomass plant powered by olive pruning and to estimate supply chain costs. *Energies*, 13(13), 3385. <https://doi.org/10.3390/en13133385>
- Lewandowski, I., Gaudet, N., Lask, J., Maier, J., Tchouga, B., & Vargas-Carpintero, R. (2018). Context. En I. Lewandowski (Ed.), *Bioeconomy* (pp. 5-16). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-319-68152-8_2
- Mehariya, S., Marino, T., Casella, P., Iovine, A., Leone, G. P., Musmarra, D., & Molino, A. (2020). Biorefinery for agro-industrial waste into value-added biopolymers: production and applications. En P. Verma (Ed.), *Biorefineries: a step towards renewable and clean energy* (pp. 1-19). Springer. https://doi.org/10.1007/978-981-15-9593-6_1
- Ministerio de Agricultura y Ganadería. (2020a). *Geoportal. Catálogo de datos - Metadatos*. <http://geoportal.agricultura.gob.ec/geonetwork/srv/spa/catalog.search>

- Ministerio de Agricultura y Ganadería. (2020b). *Panorama agroestadístico*. http://sipa.agricultura.gob.ec/descargas/panorama_estadistico/panorama_estadistico.pdf
- Ministerio de Agricultura y Ganadería. (2021a). *Superficie y producción. Histórico*. http://sipa.agricultura.gob.ec/descargas/base-estadistica/modulo_productivo/superficie-produccion.xlsx
- Ministerio de Agricultura y Ganadería. (2021b). *Rendimientos 2020*. http://sipa.agricultura.gob.ec/descargas/estudios/rendimientos/resultados_rendimientos_2020.pdf
- Morato, T., Vaezi, M., & Kumar, A. (2019). Developing a framework to optimally locate biomass collection points to improve the biomass-based energy facilities locating procedure – A case study for Bolivia. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 107, 183-199. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.03.004>
- Netele, M. (2004). *Advanced Data Bases. Part 4: Vector network analysis* [Presentación de diapositivas]. https://grassbook.org/wp-content/uploads/neteler/corso_dit2004/grass04_4_vector_network_neteler.pdf
- Núñez Camargo, D. W. (2012). Uso de residuos agrícolas para la producción de biocombustibles en el departamento del Meta. *Tecnura*, 16(34), 142-156. <https://doi.org/10.14483/udistrital.jour.tecnura.2012.4.a10>
- Obi, F. O., Ugwuishiwu, B. O., & Nwakaire, J. (2016). Agricultural waste concept, generation, utilization and management. *Nigerian Journal of Technology*, 3(4), 957-964. <https://doi.org/10.4314/njt.v35i4.34>
- Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. (2018). *FAOSTAT*. <http://www.fao.org/faostat/es/#data/QC>
- Riera, M. A., Maldonado, S., & Palma, R. R. (2019). Residuos agroindustriales generados en Ecuador para la elaboración de bioplásticos. *Revista Ingeniería Industrial*, 17(3), 227-246. <https://doi.org/10.22320/s07179103/2018.13>
- Ruiz-Ramírez, J., Hernández-Rodríguez, G. E., & Zulueta-Rodríguez, R. (2011). Análisis de series de tiempo en el pronóstico de la producción de caña de azúcar. *Terra Latinoamericana*, 29(1), 103-109. http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0187-57792011000100103&nrm=iso
- Sahoo, K., Hawkins, G. L., Yao, X. A., Samples, K., & Mani, S. (2016). GIS-based biomass assessment and supply logistics system for a sustainable biorefinery: a case study with cotton stalks in the Southeastern US. *Applied Energy*, 182(C), 260-273. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.08.114>
- Salas-Navarro, K., Meza, J. A., Obredor-Baldovino, T., & Mercado-Caruso, N. (2019). Evaluación de la cadena de suministro para mejorar la competitividad y

- productividad en el sector metalmecánico en Barranquilla, Colombia. *Información Tecnológica*, 30(2), 25-32. <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-07642019000200025>
- Santibáñez-Aguilar, J. E., Flores-Tlacuahuac, A., Betancourt-Galván, F., Lozano-García, D. F. & Lozano, F. J. (2018). Facilities location for residual biomass production system using geographic information system under uncertainty. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 6(3), 3331-3348. <https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.7b03303>
- Serrano-Hernández, A., Cardaso, L., & Faulin, J. (2021). Solving a biorefinery location problem case in Spain: uncertainty in strategic decisions. *Transportation Research Procedia*, 52, 67-74. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2021.01.009>
- Sistema Nacional de Información. (2014). *Información geográfica. Accesibilidad y vialidad. Vías del Ecuador Escala 1:50000*. <https://sni.gob.ec/accesibilidad-y-vialidad>
- Siqueira, S. F., Francisco, É. C., Queiroz, M. I., De Menezes, C. R., Zepka, L. Q., & Jacob-Lopes, E. (2016). Third generation biodiesel production from microalgae. *Brazilian Journal of Chemical Engineering*, 33(3), 427-433. <https://dx.doi.org/10.1590/0104-6632.20160333s20150134>
- Toulkeridis, T., Tamayo, E., Simón-Baile, D., Merizalde-Mora, M. J., Reyes-Yunga, D. F., Viera-Torres, M., & Heredia, M. (2020). Cambio climático según los académicos ecuatorianos. Percepciones versus hechos. *La Granja: Revista de Ciencias de la Vida*, 31(1), 21-46. <https://doi.org/10.17163/lgr.n31.2020.02>
- Trigo, E. J., Henry, G., Sanders, J., Schurr, U., Ingelbrecht, I., Revel, C., Santana, C., & Rocha, P. (2014). Hacia un desarrollo de la bioeconomía en América Latina y el Caribe. En E. Hodson de Jaramillo (Ed.), *Hacia una bioeconomía en América Latina y el Caribe en asociación con Europa* (pp. 17-46). Editorial Pontificia Universidad Javeriana. <http://www.cursobioeconomia.mincyt.gob.ar/wp-content/uploads/2014/12/Hacia-una-bioeconomia-1.pdf>
- Zimmermann, Mb. (2017). *Routing with GRASS GIS: Catchment area calculation*. <https://www.zimmi.cz/posts/2017/routing-with-grass-gis-catchment-area-calculation/>

