

## MODELO PARA LA LOCALIZACIÓN DE BIO-REFINERÍAS A BASE DE RESIDUOS AGRÍCOLAS DE COSECHA EN LA PROVINCIA DE CÓRDOBA-ARGENTINA

Rocío E. Guido<sup>1</sup>, Verónica M. Javi<sup>2</sup>, C. Ramiro Rodríguez<sup>3</sup>, Oscar A. Oviedo<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Instituto de Investigaciones en Físico-química de Córdoba, Departamento de Química Teórica y Computacional, Facultad de Ciencias Químicas, Universidad Nacional de Córdoba, Córdoba, Argentina.

<sup>2</sup> Instituto de Investigaciones en Energía No Convencional, Facultad de Ciencias Exactas, Universidad Nacional de Salta, Salta, Argentina.

<sup>3</sup> Departamento de Matemática, Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales de la Universidad Nacional de Córdoba, Córdoba, Argentina.

Tel. + 54 9 0351 5353853 Int. 55189 e-mail: [o.a.oviedo@unc.edu.ar](mailto:o.a.oviedo@unc.edu.ar), [rocioeguido@unc.edu.ar](mailto:rocioeguido@unc.edu.ar)

**RESUMEN:** El presente trabajo tiene por objetivo continuar con el desarrollo de un modelo computacional que permita determinar la localización de bio-refinerías, teniendo en cuenta factores geospaciales, técnicos y socio-ambientales. Estos últimos a partir de un análisis de las regiones inapropiadas, excluidas y/o prohibidas. El modelo combina herramientas de un Sistema de Información Geográfica y algoritmos computacionales "ad-hoc". Es aplicado a la provincia de Córdoba, utilizando los residuos del cultivo de maíz correspondiente a la campaña 2017/2018. Se analizaron diversos escenarios, variando los principales parámetros del modelo (humedad, factor de residuo y fracción de extracción sostenible del rastrojo de maíz), obteniendo la geolocalización de las 5 bio-refinerías de mayor masa acumulada y las distancias recorridas entre los sitios de disponibilidad de la biomasa y las bio-refinerías. Entre los resultados más promisorios se obtuvo que la localización se mantiene prácticamente invariante para todas las simulaciones, incluso cambiando en un orden de magnitud las variables. Esta independencia de la localización de las bio-refinerías es un hallazgo positivo que le otorga robustez a los futuros proyectos de revalorización de biomasa para la provincia de Córdoba, en acompañamiento a las nuevas legislaciones de apoyo a su desarrollo.

**Palabras claves:** Sistema de Información Geográfica. Biomasa residual. Transporte de biomasa. Bio-refinería. Bioenergía. Bioeconomía.

### INTRODUCCIÓN

La biomasa es una abundante fuente de energía renovable altamente dispersa y geográficamente dependiente, que puede ser utilizada para la producción de una serie de combustibles y productos químicos (Sultana y Kumar, 2012). Se prevé que su utilización con fines energéticos aumente sustancialmente en las próximas décadas (International Energy Agency - IEA, 2021) principalmente de materias primas lignocelulósicas, como ser cultivos energéticos dedicados, desechos de bosques u orgánicos, y residuos de cultivos (Richard, 2010).

En noviembre del 2020, la provincia de Córdoba promulgó la ley 10.721 de Promoción y Desarrollo para la Producción y Consumo de Biocombustibles y Bioenergía, fomentando el desarrollo de la bioeconomía en sus diferentes aspectos, apostando a la transformación de la biomasa, agregando

valor en origen, industrializando los procesos y cadenas de valor, generando nuevos y más calificados empleos sustentables y resolviendo pasivos ambientales, lo que constituye un hecho no menor.

Para aprovechar el recurso, la biomasa debe ser acondicionada y transformada en las llamadas "bio-refinerías", en donde ingresa la materia prima rica en polisacáridos renovables y lignina, y es fraccionada y convertida en una mezcla de productos. Esta visión de bio-refinería contribuirá a la sostenibilidad no solo por su dependencia inherente de recursos biológicos sostenibles, sino también por la capacidad de acoplarse a otros ciclos como el reciclaje de residuos. El objetivo central se encuentra en elaborar procesos que sean del tipo carbono neutral (Ragauskas et al., 2006).

Numerosos autores han estudiado la localización óptima de bio-refinerías utilizando residuos agrícolas, mediante el empleo de Sistemas de Información Geográfica (SIG), y utilizando algoritmos de optimización (Beccali et al., 2009; Perpiña et al., 2009; Sultana y Kumar, 2012; Höhn et al., 2013; Sahoo et al., 2018). En particular Sultana y Kumar (2012) desarrollaron una metodología para determinar las ubicaciones, tamaños y número de bioplantas de pellets para la provincia de Alberta-Canadá, a través de la optimización de algoritmos de costos de transporte, costos de producción de pellets, considerando la red vial local y la variación espacial de biomasa. En el mejor de nuestro conocimiento, no se registran estudios de este tipo en la provincia de Córdoba-Argentina.

Dada esta área vacante, el objetivo del presente trabajo es el desarrollo de un modelo que permita analizar la localización óptima de bio-refinerías, realizando un análisis exploratorio dentro de un entorno SIG, considerando la exclusión de áreas inapropiadas, combinado con algoritmos de optimización. La aplicabilidad del modelo será mostrada empleando datos geoespaciales del cultivo de maíz de la provincia de Córdoba extraídos del Geoportal - IDECOR (García et al., 2019) y de rendimiento de cosecha de la Bolsa de Cereales de Córdoba - BCCBA (2020).

*Las bio - refinerías y los residuos agrícolas de cosecha sostenibles (RACS):* Al estudiar la localización de una bio-refinería, uno de los principales aspectos a tener en cuenta es la logística, entre ella el transporte de las fuentes de biomasa hacia los centros de transformación. La amplia variedad de tipos de materias primas y las diferentes características de las mismas agregan complejidad al tema. El volumen, la relación de densidad, el contenido de humedad, la estacionalidad y el carácter cíclico de los lugares de recolección varían según el tipo de biomasa (Ko et al., 2018).

Los Residuos Agrícolas de Cosecha Sostenibles (RACS), es un término asociado a una pequeña porción de la masa total de Residuos Agrícolas de Cosecha (RAC), que puede ser empleada para su revalorización, sin que esto pueda desencadenar en una baja producción de carbono en la materia orgánica del suelo para futuros años (Álvarez y De Paepe, 2019). Los RACS derivados del maíz tienen una densidad energética considerablemente menor que la de los granos, lo que resulta en la necesidad de incrementar el volumen para que los proyectos sean técnica y económicamente viables (Richard, 2010). Además, existe un delicado equilibrio entre el costo de transporte y la capacidad de la bio-refinería. En una primera instancia, el costo de transporte de la biomasa aumenta proporcionalmente a la raíz cuadrada de la capacidad de la planta, mientras que el costo de capital unitario disminuye con dicha capacidad (Sultana et al., 2010). Los costos de transporte representan una des-economía de escala para biocombustibles lignocelulósicos que contrastan con las economías de escala asociadas con tecnologías de conversión avanzadas (Richard, 2010). No menos importante se debe considerar además limitaciones del tipo legales, ambientales, sociales, entre otras (Sultana y Kumar, 2012; Sahoo et al., 2018). Por lo tanto, la evaluación debe ser considerada con variables multidimensionales que combinan idoneidad socio-ambiental con la optimización técnico-económica.

Argentina posee una gran oferta de diversos tipos de biomasa (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura - FAO, 2020) que puede ser revalorizada. Guido et al. (2020), evaluaron el potencial bioenergético de la provincia de Córdoba, a partir de diversos tipos de biomasa residual, sin incluir RAC. Además, existe una gran oferta de RAC (Montico y Di Leo, 2009; Menéndez y

Hilbert, 2013; Acevedo y Cruzate, 2018). Considerando criterios de sostenibilidad para la provincia de Córdoba, la disponibilidad de RACS de soja y maíz alcanza las 1.467.885 [tn/año] y 2.439.619 [tn/año], respectivamente; y el contenido bioenergético de estos residuos es equivalente a 17 veces el contenido energético fósil extraído por el yacimiento Vaca Muerta, durante todo 2020 (Guido et al., 2021). Estos resultados muestran a las claras la necesidad de avanzar en esquemas que contemplen la revalorización de los residuos.

## METODOLOGÍA PARA LA LOCALIZACIÓN DE LAS BIO-REFINERÍAS

*Variación espacial de rastrojos y localización de centros de acopio:* en un trabajo previo (Guido et al., 2021) se estimó el potencial bioenergético de rastrojos de maíz para la provincia de Córdoba correspondiente a la campaña 2017/2018, utilizando datos geospaciales (García et al., 2019), y trabajando en el software QGIS (Versión 3.16, Sistema de Referencia de Coordenadas: POSGAR 98, EPSG 22174). A partir de los registros del área cultivada de maíz, se estimó la disponibilidad de masa total provincial de RACS,  $M_{\text{mat}}$ , como la suma de la masa de los 26 departamentos  $j$ , designada como  $m_j$ , de acuerdo a:

$$M_{\text{mat}} = \sum_{j=1}^{26} m_j \quad (1a)$$

$$m_j = [\eta_j \times R_j] [(1-h) \times FR \times \delta] \left( a \sum_{i=1}^{N_j} \Gamma_{i,j} \right) \quad (1b)$$

donde  $\eta_j$  corresponde a la eficiencia siembra/cosecha y  $R_j$  al rendimiento del maíz, ambos con descripción departamental.  $h$  corresponde a la pérdida de humedad (en masa),  $FR$  es el factor de residuo y  $\delta$  un factor que cuantifica la remoción de los RAC de maíz que permite no influir en la sostenibilidad fisicoquímica del suelo.  $\Gamma_j$  es un vector binario que georreferencia una porción de la superficie de Córdoba, pudiendo tomar el valor de 1 si la porción está sembrada con maíz, o 0 si no lo está. Este vector codifica la información asociada al cultivo pixel por pixel (variable  $i$ ) en un SIG.  $N_j$  corresponde al subconjunto de píxeles incluidos dentro de cada departamento  $j$  y  $a$  es el área del pixel cuyo valor es  $7,5 \times 10^4$  [km<sup>2</sup>]. Luego de la aplicación de geoprocursos de categorización, vectorización y clusterización se identificaron los Centros de Acopio Primarios (CAP). Los CAP acumulan la biomasa residual de maíz. En el presente trabajo se parte de esta instancia. Para mayor detalle del procedimiento se puede consultar la referencia (Guido et al., 2021).

*Análisis de exclusión:* la localización de los sitios óptimos para la instalación de las bio-refinerías, deben considerar factores ambientales, económicos y sociales junto a la normativa aplicable (Sultana y Kumar, 2012). De esta forma, se identifican áreas inadecuadas para su posterior exclusión en el análisis. En la Tabla 1, se muestran los factores limitantes que fueron considerados en este trabajo, junto a las referencias de los datos espaciales utilizados. Se incluyen tanto elementos ambientales y naturales, como antrópicos, obtenidos de la literatura (Sultana y Kumar, 2012). Es importante considerar que la aceptación social es de fundamental importancia para cualquier proyecto ambiental, y la participación ciudadana debe estar en todas las etapas de un proyecto.

Para incluir cada factor limitante dentro del SIG, se empleó la siguiente metodología. Se adaptaron las bases de datos de los diferentes factores para ser incluidos en un mismo SIG. Para cada factor y de acuerdo a la Tabla 1, se generó una zona de amortiguamiento, también llamada "buffer", utilizando diferentes geoprocursos embebidos en el Software QGIS (2021).

Factor limitante	Buffer [km]	Áreas excluidas (km <sup>2</sup> )	%	Fuente
Zonas urbanas	1	17.275	15,8	Geoportal IDE de la Provincia de Córdoba, Instituto Geográfico nacional IGN
Zonas industriales	1	2.031	1,9	Secretaría de Industria, Ministerio de Industria, Comercio y Minería de la Provincia de Córdoba
Zonas mineras	1	3.740	3,4	Geoportal IDE de la Provincia de Córdoba
Cuerpos y cursos de agua	0,2	23.718	21,6	Geoportal IDE de la Provincia de Córdoba
Humedales	0,2	55	0,1	IGN
Áreas ambientalmente sensibles (zonas inundables, áreas de conservación)	0,5	39.161	35,7	Geoportal IDE de la Provincia de Córdoba, IGN
Red vial	0,03	5.913	5,4	Geoportal IDE de la Provincia de Córdoba
Líneas de transmisión	0,1	9.390	8,6	Secretaría de Energía de la Nación (Ex-MINEM)
Gasoductos y oleoductos	0,1	281	0,3	Secretaría de Energía de la Nación (Ex-MINEM)
Pendiente del terreno	Áreas con pendiente > 15%	8.097	7,4	Geoportal IDE de la Provincia de Córdoba
	Superficie excluida real	76.170		

Tabla 1: Factores limitantes considerados para el análisis de exclusión.

Se elaboraron 10 mapas *raster*, contiendo un vector binario,  $\theta_{ij}$ , ( $i$ =pixel y  $j$ = factor limitante), utilizando una resolución de 25 m x 30 m para toda la superficie de la provincia de Córdoba. Valores de  $\theta_{ij} = 1$  se corresponden con superficies libres para la instalación de una bio-refinería, mientras que pixeles categorizados con  $\theta_{ij} = 0$ , representan áreas a excluir. Finalmente, todos los factores limitantes fueron condensados en un único vector,  $\Theta_i$ , de acuerdo a:

$$\Theta_i = \prod_{j=1}^{10} \theta_{ij} \quad (2)$$

La ecuación 2, es la productoria de los factores limitantes individuales, que impone la condición que: mientras uno de ellos sea nulo, es condición suficiente para excluir dicha región.  $\Theta_i$  es un vector binario pixel por pixel, georreferenciado.

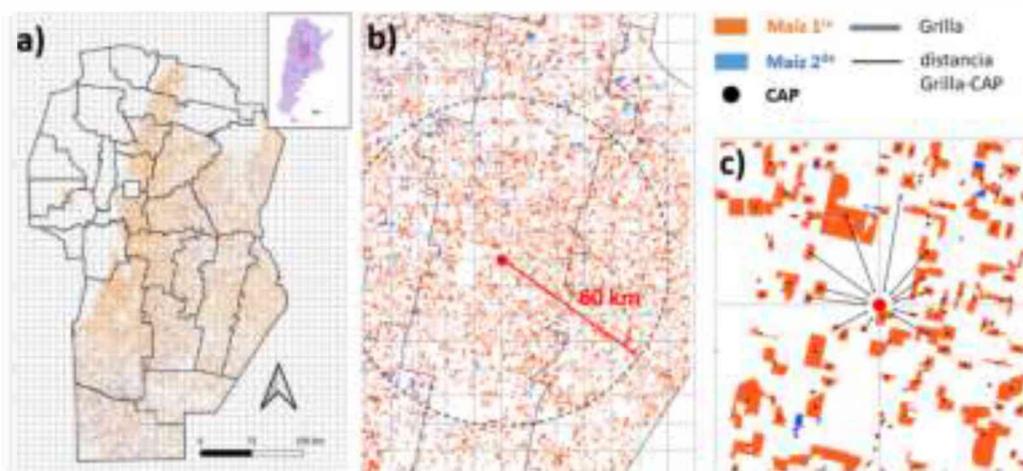
**Algoritmo para la localización de las bio-refinerías:** estas son obtenidas a partir de la localización de los CAP, entes matemáticos georreferenciados que acumulan la masa de RACS de maíz. La localización de las bio-refinerías debe considerar el transporte de los RACS, desde los CAP, para su procesamiento y/o revalorización energética. Para ello, se desarrolló un código ad-hoc.

La menor porción transportable, llamada megafardo (MF), consiste en una acumulación de aproximadamente 400 [kg] de RACS, inicialmente localizados en los CAP. Estos MF son transportados hacia la bio-refinería más cercana, mediante camiones que tienen una capacidad de transporte de 50 MF cada uno (valor estimado en este trabajo). Se consideró un factor de pérdida (en masa) en el proceso del 15% (Sultana et al., 2010). Para tener en cuenta un escenario más realista, se evaluó solo aquellos CAP que puedan completar al menos el 80% de la capacidad de transporte de un camión, el resto fue excluido del análisis. Aunque no mostrado aquí, esta variable de capacidad no tiene influencia en la localización final de las bio-refinerías. Como se verá en la sección de resultados, el número de CAP excluido es importante, sin embargo, el aporte de RACS de estos es relativamente bajo. Es conocido que los costos de transporte son la principal componente en la viabilidad económica de los proyectos de revalorización de biomasa (Ko et al., 2019), por lo cual se torna importante considerar el factor de capacidad en el transporte. Claramente existen diferentes esquemas para transportar la biomasa en la provincia de Córdoba, por ejemplo: camiones con acoplado, bi-trenes, el uso de tractores para una acumulación primaria, entre otros; esos esquemas no serán analizados en este trabajo y serán insumos para análisis posteriores.

**Selección de la localización de las bio-refinerías:** se realizó en función de la disponibilidad de RACS. Se discretizó la superficie de la provincia de Córdoba mediante una grilla rectangular de puntos equiespaciados de 10 km (ver Figura 1a). El algoritmo evalúa cada punto de la grilla acumulando la masa de RACS de los CAP contenidos dentro de una circunferencia de radio igual a 60 km. Este radio fue seleccionado como un valor intermedio de los encontrados en la revisión bibliográfica. De acuerdo al trabajo de revisión de Ko et al. (2018), la distancia óptima de traslado de biomasa varía ampliamente con las condiciones de logística. Una comparación directa entre distintos casos no es apropiada, ya que cada uno posee diferentes tamaños de plantas y volúmenes de transporte, además de desarrollarse en diferentes entornos geográficos. En general, el camión es el modo más competitivo para distancias de hasta 30-250 km, aunque también puede ser rentable a mayores distancias, en condiciones logísticas específicas. Es importante mencionar que este radio de acumulación constituye también un hiperparámetro del modelo que debe ser ajustado. Otros autores citados en el mencionado estudio, y que han utilizado un esquema similar (transporte en camiones de rastrojos de maíz) emplearon distancias máximas de 100 km en Estados Unidos (Searcy et al., 2007) y 170 km para una región de Canadá (Mahmudi y Flynn, 2006). Por su parte, para otros proyectos biomásicos, Sahoo et al. (2018) utilizaron un radio de recolección medio de entre 18-35 km, y como máximo 50 km, Höhn et al. (2013) entre 10-40 km, y Sultana et al. (2010) entre 16-33 km.

La Figura 1 muestra un esquema que ejemplifica el proceso de evaluación del algoritmo para un punto de la grilla en el centro del departamento Unión. En la Figura 1a se muestra un mapa de la provincia de Córdoba, junto con la disponibilidad de RACS de maíz de 1º (naranja) y 2º (azul), conteniendo la grilla generada (líneas grises), en donde la intersección de las líneas genera los puntos de grilla a evaluar. La Figura 1b muestra un punto (rojo) de la grilla en el centro del departamento Unión, junto con la distribución de los RACS de maíz y el radio de recolección de 60 km. Incrementando el detalle de la región, en la Figura 1c se pueden observar además los CAP (puntos negros), y con flechas se ejemplifica su contribución hacia el punto rojo de la grilla evaluada. Las zonas naranjas y azules corresponden a las parcelas sembradas con maíz.

El algoritmo clasifica y jerarquiza los puntos de la grilla de acuerdo a la masa de RACS acumulada. El punto que mayor masa acumule es elegido como candidato a contener la primera bio-refinería. El punto candidato es sometido al análisis de exclusión según la ecuación (2) para validar la posibilidad de instalación. Si  $\Theta_i = 1$ , el sitio es validado. Si  $\Theta_i = 0$ , el algoritmo evalúa la distancia entre los pixeles que cumplen la condición de  $\theta_{ij} = 1$ , y el punto de la grilla candidato, seleccionando aquel pixel que presente la menor distancia como el nuevo mejor candidato.



**Figura 1:** a) límites departamentales de la provincia, junto con la distribución de RACS. b) área de influencia para un radio de recolección de 60 km desde un punto de la grilla (rojo). c) CAP y su contribución hacia el punto de la grilla.

Luego de seleccionar la instalación de la primera bio-refinería, los CAP contenidos en un radio de 60

km son anulados, dado que su masa está comprometida y ya no está disponible. Esto genera una nueva distribución provincial de RACS, que es sometida a evaluación del algoritmo para obtener la localización de la segunda bio-refinería.

El proceso puede ser repetido hasta la revalorización de toda la biomasa disponible. En el presente trabajo se analizará la instalación de las 5 bio-refinerías, aquellas que acumulen mayor RACS. La Figura 2 muestra una serie de mapas de contorno obtenidos durante una corrida del algoritmo, que permite visualizar la disponibilidad (escala de colores) y distribución de RACS de maíz acumulados de la superficie de Córdoba. La Figura 2a muestra la disponibilidad total a la entrada del algoritmo, utilizando los valores de los parámetros de la referencia (Guido et al., 2021) junto al punto de mayor acumulación. La Figura 2b muestra la nueva distribución de RACS acumulada luego de anular los CAP que se comprometen en la primera bio-refinería. Esta Figura además, muestra la ubicación de la segunda bio-refinería. La Figura 2c, muestra la distribución de masa acumulada de los CAP y también el punto de mayor acumulación, para la tercera bio-refinería.

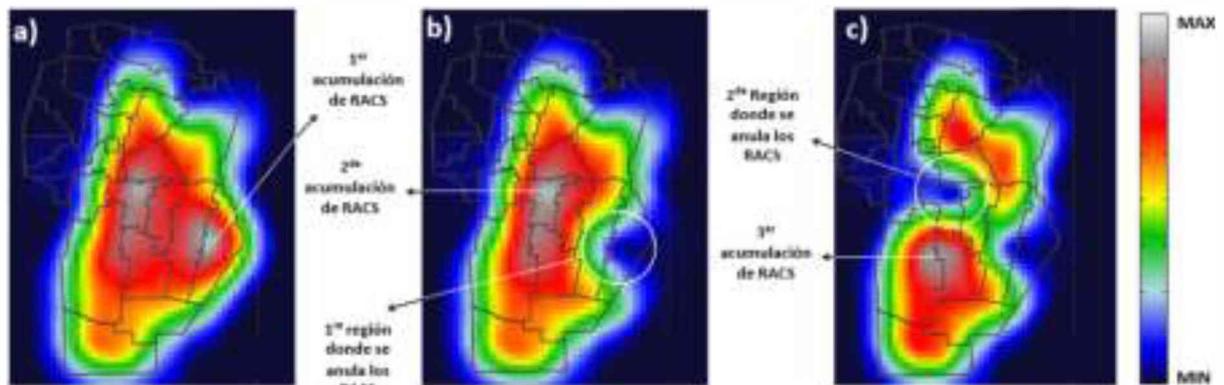


Figura 2: disponibilidad de RACS de maíz acumulada de la superficie provincial, para la bio-refinería 1 (a), bio-refinería 2 (b) y bio-refinería 3 (c).

**Análisis exploratorio y evaluación de escenarios:** Para evaluar el efecto en la localización de las bio-refinerías, se realizó un análisis exploratorio de las variables en la ecuación (1), dando origen a 10 escenarios de evaluación. La Tabla 2 muestra los valores de  $FR$ ,  $h$  y  $\delta$  analizados para cada escenario. Los parámetros  $\eta_j$ ,  $R_j$ ,  $\Gamma_{1j}$  y  $N_j$  se mantuvieron constantes en todos los escenarios, sus valores fueron informados previamente (Guido et al., 2021).

Los diferentes escenarios, dados en la Tabla 2, fueron construidos considerando la variabilidad de los parámetros informados por otros autores para el caso particular de RAC de maíz para la región de la provincia de Córdoba. El factor de residuo fue calculado de acuerdo a  $FR = (1 - K) / K$  y el intervalo de valores obtenido fue [0,30-0,60] de acuerdo a las referencias (Haro et al., 1999; Vega et al., 2000; Rivetti, 2007; Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria - INTA, 2015). El intervalo de valores del término conteniendo la fracción sostenible,  $\delta$ , es [0,05-0,30] y fueron extraídos de las referencias (Menéndez y Hilbert, 2013; Álvarez y De Paepe, 2019). El porcentaje de pérdida de humedad,  $(1 - h)$ , fueron extraídos de la Referencia (Sultana et al., 2010; Miranda et al., 2018).

Escenario	$FR$	$\delta$	$(1-h)$	Escenario	$FR$	$\delta$	$(1-h)$
1	1,00	0,25	0,86	6	0,67	0,25	0,86
2	1,00	0,30	0,86	7	1,50	0,25	0,86
3	1,00	0,10	0,86	8	1,00	0,25	0,88
4	1,00	0,05	0,86	9	1,00	0,25	0,90
5	2,33	0,25	0,86	10	1,00	0,25	0,92

Tabla 2: especificación de los valores de los parámetros del modelo, utilizados para cada escenario.

## RESULTADOS

**Mapa de exclusión:** de la Tabla 1 se desprende que el principal factor limitante es el de áreas ambientalmente sensibles, que incluye zonas anegables, parques nacionales y provinciales y áreas protegidas, con un 35,7 % de la superficie excluida. Luego le sigue el de cursos y cuerpos de agua, con un 21,6 %, y en tercer lugar se encuentran las zonas urbanas con un 15,8 %. Se debe mencionar que algunas de las zonas excluidas se solapan con las de otros factores limitantes, por lo que la superficie excluida real es de 76.170 [km<sup>2</sup>]. El área total de la provincia de Córdoba (calculada a partir del mapa raster) es de 164.759 [km<sup>2</sup>], es decir que se excluyó el 46 % de la superficie provincial. Por lo tanto, el área disponible para la localización de las bio-refinerías es del 54 %. La Figura 3a-d muestra los principales factores limitantes (ver Tabla 1) que determinan mayoritariamente el área excluida total. La Figura 3e muestra el mapa final obtenido luego de la productoria según la ecuación (2), codificado por colores (naranja  $\Theta_i = 1$ , negro  $\Theta_i = 0$ ).

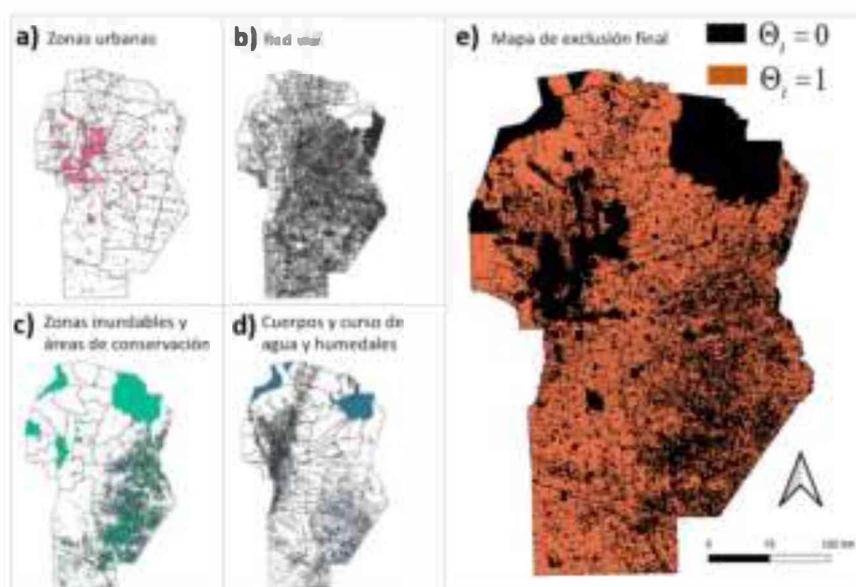


Figura 3: Mapas de exclusión para cada factor limitante a) zonas urbanas, b) red vial c) zonas ambientalmente sensibles y d) cuerpos, cursos de agua y humedales e) Mapa binario final de exclusión.

**Análisis de parámetros - Evaluación de escenarios:** como se mencionó párrafos arriba, en trabajos previos (Guido et al., 2021) se obtuvo la potencial oferta de RACS de maíz para la provincia de Córdoba, de acuerdo a la ecuación (1). Este valor fue de  $M_{\text{max}} = 2.439.619$  [tn/año] correspondiente a la campaña 2017/2018. El Escenario #1, utilizado como escenario base, de la Tabla 2 fue generado utilizando los mismos valores para los parámetros dados en la referencia antes mencionada. Sin embargo, la cantidad de RACS factible de revalorizar en el presente modelo considera además la

restricción de logísticas discutidas secciones arriba (80% de capacidad del camión y pérdidas por el transporte hacia las bio-refinerías). Considerando estos factores y teniendo en cuenta que se instalan las 5 bio-refinerías con mayor acumulación de biomasa, la disponibilidad de RACS al ingreso de las mismas se reduce a  $M_{B1}=1.140.156$  [tn/año], prácticamente a la mitad (47%).

En la Tabla 3 se muestran los valores de masa a revalorizar, el número de CAP suministrando dichos RACS, el número de camiones y la distancia recorrida (línea recta) para cada escenario. También compara los valores de la oferta potencial de biomasa  $M_{pot}$ , con los valores de masa revalorizada de cada escenario  $M_{B}$ , y estos últimos respecto del escenario base ( $M_{B1}$ ), además los CAP totales con respecto a los CAP de cada escenario, y estos últimos con respecto al E1.

Se puede observar que el Escenario #5 es el que mayor masa dispone en la puerta de la bio-refinería, y por lo tanto presenta un mayor recorrido, siendo este el de mayor  $FR$ . Por otro lado, el Escenario #4, con un valor de  $\delta=0,05$ , se corresponde a la menor masa revalorizada y por lo tanto insume un menor recorrido. Entre ambos escenarios hay una relación de revalorización cercana a 15 veces.

Escenarios	$M_B$ [tn]	$M_B / M_{pot}$	$M_B / M_{B1}$	Centros de acopio (n.º)	$CAP_B / CAP$	$CAP_B / CAP_{B1}$	Camiones (n.º)	Distancia [km]
E1	1.140.156	0,47	1,00	9.973	0,26	1,00	54.230	2.133.742
E2	1.379.476	0,57	1,21	10.616	0,28	1,06	66.041	2.598.055
E3	418.947	0,17	0,37	6.517	0,17	0,65	19.342	760.320
E4	180.019	0,07	0,16	3.888	0,10	0,39	8.108	315.158
E5	2.730.307	1,12	2,39	12.692	0,33	1,27	132.897	5.227.939
E6	741.775	0,30	0,65	8.586	0,23	0,86	34.810	1.369.142
E7	1.738.236	0,71	1,52	11.392	0,30	1,14	83.750	3.294.319
E8	1.168.047	0,48	1,02	10.058	0,27	1,01	55.637	2.188.714
E9	1.195.971	0,49	1,05	10.143	0,27	1,02	57.006	2.243.220
E10	1.223.905	0,50	1,07	10.227	0,27	1,03	58.352	2.295.403

Tabla 3: valores y relaciones de masa y transporte obtenidas del análisis de los 10 escenarios.

La Figura 4 muestra dos mapas conteniendo, en mayor detalle, los CAP que cumplen con la condición óptima de transporte (puntos amarillos) y aquellos que no lo cumplen (puntos negros), la ubicación de la bio-refinería que mayor biomasa acumula (punto verde), el radio de acumulación de 60 km que incluye los departamentos Unión, Marcos Juárez y (en menor cuantía) General San Martín, para el Escenario #4 (Figura 4a) y #5 (Figura 4b). Para el E4, se revaloriza el 79,4 % de los RACS disponibles, siendo aportantes el 29 % de los CAP totales de dicho radio. Para el E5, se revaloriza el 99,5 % de la masa de RACS disponibles en el sitio, siendo aportantes el 79,5 % de los CAP. Cada uno de estos escenarios aporta una masa en la puerta de la bio-refinería de 48.871 [tn/año] y 714.741 [tn/año], respectivamente.

De acuerdo a la ecuación (1b),  $h$ ,  $FR$  y  $\delta$  son parámetros del modelo que no dependen de la localización (es decir del departamento en cuestión), ni de la distribución de los CAP. Esta proporcionalidad del modelo, implica que  $m_j$  sea matemáticamente una función proporcional al producto de estos tres factores, definiendo de esta forma un hiperparámetro  $FN = (1-h) \times FR \times \delta$ . Se

utilizará este hiperparámetro a los fines de comparación entre los Escenarios.

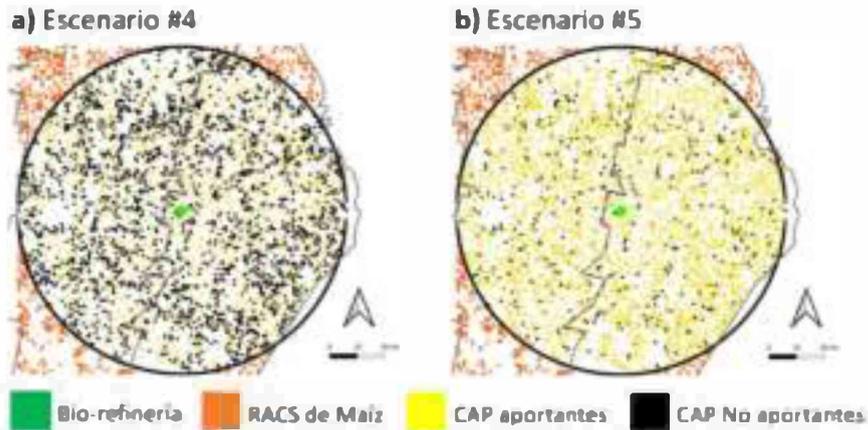


Figura 4: Mapa temático de la bio-refinería de mayor acumulación de RACS (punto verde), a) Escenario #4 y b) Escenario #5.

La Figura 5 muestra la masa de RACS acumulada en la puerta de las bio-refinerías, el número de CAP que aportan dicha biomasa (Fig. 5a), el número de camiones necesario para su transporte y la distancia recorrida en línea recta (Fig. 5b), todo en función del hiperparámetro  $FV$ ; y las localizaciones de las 5 bio-refinerías (Fig. 5c). Tanto la masa, la distancia y los camiones poseen una relación de proporcionalidad directa con  $FV$ , mientras que la relación del número de CAP aportantes a una función creciente del tipo  $\log(FV)$ . Que sea creciente se puede racionalizar por el hecho de que cuanto mayor sea el valor de  $FV$  mayor será el número de CAP que cumplen el requisito del 80%. Conforme se incrementa  $FV$ , ingresa una mayor masa acumulada a las bio-refinerías dado que por un lado aumenta el número de CAP participantes y por el otro, cada una aporta una mayor cantidad de biomasa residual. El hecho que la cantidad de CAP escale con el logaritmo de  $FV$ , implica que variaciones importantes de este no se reflejen fuertemente en la cantidad de CAP aportantes. Esto último debido a la distribución de tamaños de los CAP que caracteriza el territorio provincial (del tipo exponencial decreciente, aunque no mostrado aquí), ya que existe una gran cantidad de CAP relativamente pequeños y pocos relativamente grandes; siendo estos últimos los de mayor contribución para  $FV$  bajos.

La Figura 5c muestra un mapa temático conteniendo las localizaciones de las 5 bio-refinerías con mayor captura de RACS, junto a sus radios de captura, y la disponibilidad de RACS. Notablemente, la ubicación de las bio-refinerías en los 10 escenarios prácticamente no se ve modificada. Una inspección más detallada permite detectar que las bio-refinerías #1 y #5 cayeron en zonas de exclusión, debiendo el algoritmo desplazarlas 2 km y 3 km hasta el sitio permitido más cercano, respectivamente. Las bio-refinerías #2, #3 y #4 se ubicaron siempre en zonas permitidas.

Se debe considerar que el presente análisis fue realizado utilizando datos georreferenciados del maíz correspondiente a la campaña 2017/2018, la cual en términos históricos dista del valor medio. El rendimiento medio ponderado para 2017/2018 fue el segundo más bajo de los últimos 12 años a los cuales se tuvo acceso (BCCBA, 2020):  $R_{\text{maíz}}^{2017/18} = 630$  [tn/km<sup>2</sup>],  $R_{\text{maíz}}^{2018/19} = 908$  [tn/km<sup>2</sup>] y la media de los últimos 12 años fue de  $R_{\text{maíz}}^{2008-2019} = 727$  [tn/km<sup>2</sup>]. El incremento del rendimiento para la campaña 2018/2019 del 44 %, podría implicar un aumento directo en la disponibilidad de los RACS en los CAP, que repercutirán positivamente en el ingreso de biomasa a la bio-refinería. Sin embargo, la no linealidad en la distribución espacial de los recursos y los problemas de logísticas asociados no permiten trasladar dicha relación de forma directa a la masa a las puertas de las bio-refinerías.

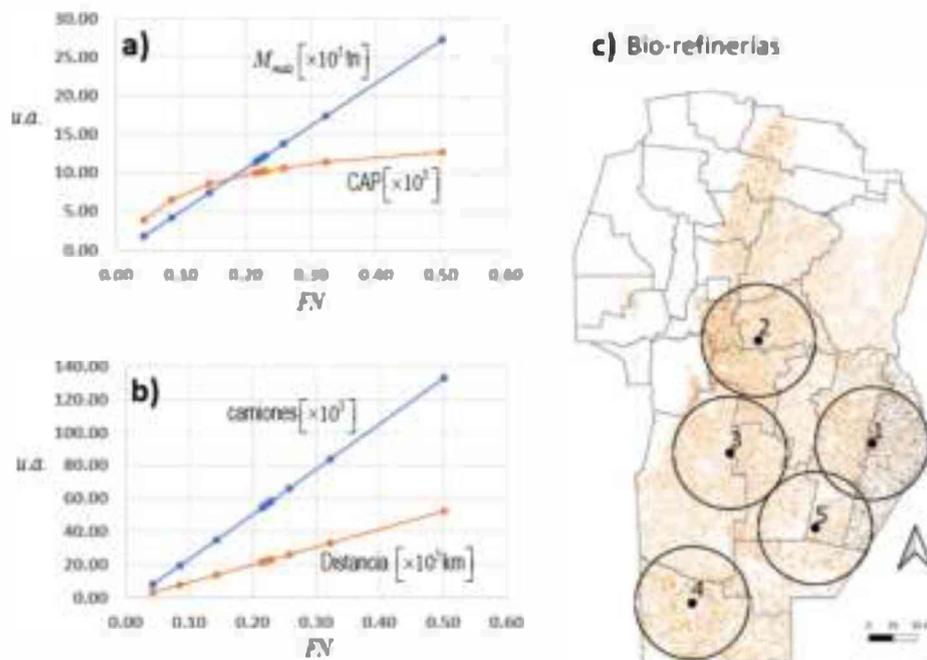


Figura 5: a) masa de RACS y CAP en función de  $FN$  para cada escenario; b) cantidad de camiones y la distancia recorrida en función de  $FN$  para cada escenario. c) localización de las 5 bio-refinerías para los 10 escenarios.

El hecho que la localización de las 5 bio-refinerías que reúnen la mayor cantidad de RACS no se modifique, no es un hallazgo que se pueda inferir a priori, incluso incrementando un orden de magnitud el hiperparámetro  $FN$  en los 10 escenarios analizados. Esto permite inferir que la localización de las mismas es robusta a la variación de los parámetros  $h$ ,  $FR$  y  $\delta$ . Posiblemente la distribución geográfica de la biomasa y por ende de los CAP en la provincia de Córdoba juegue el rol más importante. Sin embargo, para confirmar dicha afirmación será necesario analizar otras distribuciones del recurso, lo que implica tener acceso a una base de datos georreferenciada de otras campañas diferentes a la del año 2017/2018, las cuales, por el momento, no están disponibles.

## CONCLUSIONES

En el presente trabajo se desarrolló un modelo computacional para la localización de bio-refinerías, teniendo en cuenta factores geoespaciales, técnicos y socio-ambientales, aplicado a la provincia de Córdoba, para los residuos del cultivo de maíz. Se realizó un análisis de exclusión de regiones inapropiadas para dicha instalación, reduciendo el área permitida al 46% de la superficie provincial. Además, se analizaron diversos escenarios, variando los principales parámetros del modelo (humedad, factor de residuo y fracción de extracción sostenible del maíz), obteniendo la geolocalización de las 5 bio-refinerías de mayor masa acumulada y las distancias recorridas entre los sitios de disponibilidad de la biomasa y las bio-refinerías. El escenario base, E1, permite revalorizar el 47% de los RACS brutos ( $M_{acum}$ ), mientras que el escenario E5 permitiría incrementarlo al 112% (respecto del E1). El escenario de menor aprovechamiento es el E4, con el 7% de la masa bruta (respecto E1).

Las distancias recorridas para el traslado de la biomasa desde los CAP hacia las bio-refinerías son: para el E1 se recorrerían 2.133.742 [km], para el E5 5.227.939 [km] (aumentando prácticamente 2,5 veces con respecto al E1) y para el E4, 315.158 [km] (reduciéndose prácticamente 7 veces la distancia con respecto al E1), con una relación en masa entre ambos escenarios extremos de casi 17 veces. La localización de las bio-refinerías se mantiene prácticamente invariante para todas las simulaciones, incluso variando un orden de magnitud los hiperparámetros del modelo. Esta independencia de la localización de las bio-refinerías es un hallazgo positivo que le otorga una mayor robustez a los futuros

proyectos de revalorización de biomasa para la provincia de Córdoba, en acompañamiento a las nuevas legislaciones de apoyo a su desarrollo.

## AGRADECIMIENTOS

Agradecemos a la Secyt-UNC por el subsidio 33620180101091CB, y a la Bolsa de Cereales de Córdoba (BCCBA) por brindar datos. REG agradece a CONICET por su beca doctoral.

## REFERENCIAS

- Acevedo A. y Cruzate G. (2018). Biorremediación de los recursos naturales. 1a ed. - Buenos Aires: Ediciones INTA, 2018, p. 312-326.
- Alvarez R. y De Paepe J.L. Modelling the effects of stover harvest on soil organic carbon in the Pampas of Argentina. *Soil Research*, 2019, 57, 257–265. CSIRO PUBLISHING.
- BCCBA [en línea] Bolsa de Cereales de Córdoba. Dirección URL: <<https://www.bccba.org.ar>> [consulta: mayo de 2020]
- Beccali M., Columba P., D'Albertia V. y Franzitta V. (2009) Assessment of bioenergy potential in Sicily: A GIS-based support methodology. *Biomass and Bioenergy* 33 (2009)79–87.
- García C.L., Plumetto M., Teich I., Morales H., Kindgard A., Fuentes M.L., Bosio M.J. y Ravelo A. Mapas de cobertura del suelo de la provincia de Córdoba 2017/2018 2019.
- Geoportal IDE de la Provincia de Córdoba: Mapas Córdoba de IDECOR. (2020). [En línea]. Dirección URL: <<https://www.mapascordoba.gob.ar/#/mapas>> [consulta: mayo de 2020]
- Guido R., Javi V., Rodríguez R. y Oviedo, O. (2020). Mapeo del potencial bioenergético utilizando un Sistema de Información Geográfica (SIG) en la provincia de Córdoba. *Energías Renovables y Medio Ambiente* Vol. 46, pp. 25 - 32, 2020 ISSN en línea: 2684-0073 / ISSN impreso: 0328-932X
- Guido R., Javi, V., Rodríguez R. y Oviedo, O. (2021). Mapeo de la Potencialidad Bioenergética de Residuos Agrícolas de Cosecha en la Provincia de Córdoba-Argentina. Manuscrito enviado para publicación.
- Haro R., Casini C., Rainero H., Salas P., Lovera E. y Peiretti J. [En línea] "Efecto de la siembra directa de maní, dentro de un sistema de labranza cero de soja y maíz, sobre la producción y calidad del grano apto para alimento humano". INTA, 2003. Dirección URL: <<http://ciacabrera.com.ar/docs/JORNADA%2018/1-HARO.pdf>> [consulta: 4 mayo de 2021]
- Höhn J., Lehtonen E., Rasi S. y Rintala J. (2014). A Geographical Information System (GIS) based methodology for determination of potential biomasses and sites for biogas plants in southern Finland. *Applied Energy* 113 (2014) 1–10.
- Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria – INTA. (2015). El cultivo de maíz en San Luis. Información técnica 188. ISSN 0327-425X / Marzo de 2015. INTA ediciones. Colección recursos.
- Instituto Geográfico Nacional – IGN. [En línea]. Dirección URL: <<https://www.ign.gob.ar/NuestrasActividades/InformacionGeoespacial/CapasSIG>> [consulta: 18 de junio de 2019]
- International Energy Agency - IEA (2021). Net Zero by 2050. A Roadmap for the Global Energy Sector. Revised version, May 2021. 76 – 79.
- Ko S., Lautala P. y Handler R. (2018). Securing the feedstock procurement for bioenergy products: a literature review on the biomass transportation and logistics. *Journal of Cleaner Production* 200 (2018) 205-218.
- Mahmudi H. y Flynn P. C. (2006). Rail vs truck transport of biomass. *Applied Biochemistry and Biotechnology*. 129, 88-93.
- Menéndez J.E. y Hilbert J. A. (2013). Cuantificación y uso de Biomasa de residuos de cultivos en Argentina para bioenergía. *Informes técnicos Bioenergía* 2013. Año 2 N°4. ISSN 2250-8481. Ediciones Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria – INTA.
- Miranda M.T., Sepúlveda F.J., Arranz J.I., Montero I. y Rojas C.V. (2018). Analysis of pelletizing from corn cob waste. *Journal of Environmental Management*. 228 (2018) 3003-311.

- Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura - FAO. (2020). Actualización del Balance de Biomasa con Fines Energéticos en la Argentina. Colección documentos técnicos N° 19. Secretaría de Energía, Ministerio de Desarrollo Productivo, Ministerio de Agricultura, Ganadería y Pesca, Gobierno de la Nación Argentina.
- Perpiñá C., Alfonso D., Pérez-Navarro A., Peñalvo E., Vargas C. y Cárdenas R. (2009). Methodology based on Geographic Information Systems for biomass logistics and transport optimization. *Renewable Energy* 34 (2009) 555–565.
- Q-GIS Software. [en línea]. Dirección URL:<<https://www.qgis.org/es/site/>>. [consulta: 16 de junio de 2021]
- Ragauskas A., Williams C., Davison B., Britovsek G., Cairney J., Eckert C., Frederick Jr. W., Hallett J., Leak D., Liotta C., Mielenz J., Murphy R., Templer R., Tschaplinski T. (2006). The Path Forward for Biofuels and Biomaterials. *Science* 311, 484 (2006).
- Richard T. L. (2010). Challenges in Scaling Up Biofuels Infrastructure. *Science*, 329, 793-796.
- Rivetti A.R. (2007). Producción de maíz bajo diferentes regimenes de riego complementario en Río Cuarto, Córdoba, Argentina. II. Producción de materia seca". *Rev. FCA UNCuyo*. Tomo XXXIX. N° 1. Año 2007. 29-39.
- Sahoo K., Mani S., Dasb L y Bettinger P. (2018). GIS-based assessment of sustainable crop residues for optimal siting of biogas plants. *Biomass and Bioenergy* 110 (2018) 63–74.
- Sultana A., Kumar A. y Harfield D. (2010). Development of agri-pellet production cost and optimum size. *Bioresource Technology* 101 (2010) 5609–5621.
- Searcy E., Flynn P., Ghafoori E. y Kumar A. (2007). The relative cost of biomass energy transport. *Applied Biochemistry and Biotechnology*, 137, 639–652.
- Secretaría de Energía. Ministerio de Desarrollo Productivo. Gobierno de la República Argentina. Disponible en: <https://www.argentina.gob.ar/produccion/energia>
- Secretaría de Industria. [en línea]- Ministerio de Industria, Comercio y Minería de la Provincia de Córdoba. Diciembre 2017. Dirección URL: <[http://www.ciisa.inv.efn.uncor.edu/?page\\_id=77](http://www.ciisa.inv.efn.uncor.edu/?page_id=77)> [consulta: 18 de junio de 2018]
- Sultana A. y Kumar A. (2012). Optimal siting and size of bioenergy facilities using geographic information system. *Applied Energy* 94 (2012) 192–201.
- Vega C. R. C., Sadras V. O., Andrade F. H. y Uhart S. A. (2000). Reproductive Allometry in Soybean, Maize and Sunflower". *Annals of Botany* 85: 461±468, 2000.

**ABSTRACT:** The present work aims to develop a computational model for the location of bio-refineries, taking into account geospatial, technical and socio-environmental factors. These last from an analysis of inappropriate, excluded and / or prohibited regions. The model combines tools from a Geographic Information System and "ad-hoc" computational algorithms, and was applied to Córdoba province, using residues of corn crop corresponding to the 2017/2018 campaign. Various scenarios were analyzed, varying the main parameters of the model (humidity, residue factor and fraction of sustainable extraction of corn stover), obtaining the geolocation of the 5 bio-refineries with the highest accumulated mass and the distances traveled between the sites of availability of the biomass and bio-refineries. Among the most promising results is the fact that the location remains practically invariant for all simulations, even varying an order of magnitude of the variables. This independence of the location of the bio-refineries is a positive finding that gives strength to future biomass revalorization projects for Córdoba province, in addition to new legislation to support their development.

**Keywords:** Geographical Information System. Residual biomass. Biomass transportation. Biorefinery Bioenergy. Bioeconomy.