

MAPEO DE LA POTENCIALIDAD BIOENERGÉTICA DE RESIDUOS AGRÍCOLAS DE COSECHA EN LA PROVINCIA DE CÓRDOBA-ARGENTINA

Rocío E. Guido¹, Verónica M. Javi², C. Ramiro Rodríguez³, Oscar A. Oviedo¹

1. Instituto de Investigaciones en Fisicoquímica de Córdoba, Departamento de Química Teórica y Computacional, Facultad de Ciencias Químicas, Universidad Nacional de Córdoba. Haya de la Torre esq. Medina Allende, Córdoba, Argentina. Teléfono: +54 9 0351 5353853, e-mail: o.a.oviedo@unc.edu.ar, rocioeguido@unc.edu.ar
2. INENCO (UNSa-CONICET). Avda. Bolivia 5150, 4400 Salta, Argentina.
3. Departamento de Matemática, Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales de la Universidad Nacional de Córdoba, Córdoba, Argentina.

Recibido: 31/08/2021; Aceptado: 31/10/2021.

RESUMEN.- Los Residuos Agrícolas de Cosecha o rastrojos, constituyen una importante fuente de energía renovable, siempre y cuando sean utilizados de forma sostenible. Este trabajo presenta los primeros pasos hacia la elaboración de un modelo integral que permita evaluar la potencialidad bioenergética de una región considerando aspectos técnicos y ambientales. La discusión se enfoca en la provincia de Córdoba y en los rastrojos devenidos de la soja y el maíz. El modelo considera una descripción cuantitativa-georreferenciada que permite mapear, con alta resolución espacial, el potencial bioenergético a partir de residuos de cultivos. Los resultados muestran que la masa total de rastrojo es de 3.975.909 [tn/año], con una contribución de 1.467.885 [tn/año] de residuos de soja y 2.408.024 [tn/año] de residuos de maíz. A los fines de dimensionar su potencialidad, el potencial bioenergético contenido en estos residuos es equivalente a 17 veces el contenido energético fósil producido por el yacimiento Vaca Muerta, durante todo 2020. Si estos residuos son revalorizados, por ejemplo, pelletizados y quemados en centrales térmicas para generar electricidad, podrían abastecer el 89% de la demanda eléctrica anual de la provincia de Córdoba.

Palabras claves: Sistema de Información Geográfica. Biomasa residual. Bioenergía. Bioeconomía. Planificación Energética.

BIOENERGY POTENTIALITY MAPPING FROM AGRICULTURAL HARVEST RESIDUES IN CÓRDOBA PROVINCE-ARGENTINA

ABSTRACT.- Agricultural Crop Residues or stubble are an important source of renewable energy, as long as they are used sustainably. This work presents the first steps towards elaborating an integral model that allows to evaluate the bioenergetic potentiality of a region, considering technical and environmental aspects. The discussion focuses on the province of Córdoba and the stubble derived from soybean and corn. The model considers a quantitative-georeferenced description that allows to map out the bioenergetic potential from crop residues with a high spatial resolution. The results show that the total mass of stubble is 3.875.909 [tons/year], with a contribution of 1.467.885 [tons/year] of soy residues and 2.408.024 [tons/year] of corn residues. To measure its potential, the bioenergetic content contained in these wastes is equivalent to 17 times the fossil energy content produced by the Vaca Muerta oil field, throughout 2020. If this waste is pelletized and burned in thermal power plants to generate electricity, it could supply 89% of the demand of Córdoba province.

Keywords: Geographical Information System, bioeconomy, biomass, bioenergy, energetic planification.

1. INTRODUCCIÓN

La biomasa constituye un abundante recurso renovable, disponible para la producción de bioenergía y biomateriales. Incrementar su utilización permitiría satisfacer las necesidades energéticas de la sociedad a futuro (Ragauskas et al., 2006), siempre y cuando su manejo sea de forma sostenible. En las próximas décadas, la industria bioenergética deberá experimentar un crecimiento masivo para abordar las demandas sociales de reducción en las emisiones netas de carbono (Richard, 2010). De acuerdo a la Agencia Internacional de la Energía (IEA, 2021), para lograr la meta de emisiones netas iguales a cero al año 2050, a nivel

global, la participación de la biomasa moderna en la matriz primaria deberá prácticamente triplicarse, es decir, escalar a 102 EJ/año, con respecto a niveles actuales (38 EJ en 2020). Al presente, el uso de la biomasa tradicional es de 25 EJ (hornos y estufas para cocción y calefacción poco eficientes (Manrique, 2017)). Este uso deberá desaparecer para 2030, para alcanzar las metas dentro del Objetivo de Desarrollo Sostenible N° 7 de la Organización de las Naciones Unidas (IEA, 2021).

Argentina posee una abundante y variada oferta de biomasa, de tipo seca y húmeda, en todo su territorio, como se evidencia en el informe técnico de Actualización del Balance

de Biomasa con Fines Energéticos en la Argentina, realizado por la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura - FAO (2020). En el mismo se analizaron diversas fuentes de biomasa, aunque no se consideraron los RAC de cultivos agrícolas extensivos, como la soja o el maíz, ya que se partió de la premisa de que, bajo la práctica de siembra directa, estos se mantienen en el campo para conservar la fertilidad y estructura de los suelos.

Las metas de disminución de emisiones de carbono nacional y global, junto con la disponibilidad de recursos de biomasa a partir del uso sustentable de RAC, evidencian la necesidad del desarrollo de modelos que permitan calcular y/o revalorizar energéticamente la biomasa, en particular aquella residual, derivada de los rastrojos agrícolas. Estos presentan una excelente opción de ser incorporados cuantitativamente como un recurso renovable dentro de la matriz energética provincial y nacional, sin entrar en competencia con la alimentación humana y la conservación del suelo. Es así que, en el presente trabajo se presentan los primeros pasos hacia la elaboración de un modelo integral que permita evaluar la potencialidad bioenergética de una región considerando aspectos técnicos y ambientales.

1.1. La biomasa en la matriz energética argentina y cordobesa.

De acuerdo al Balance Energético Nacional (año 2019), la biomasa contribuyó en un 5,97 % a la matriz energética primaria del país (Secretaría de Energía de Argentina, 2019), incluyendo las categorías leña, bagazo, aceites y alcoholes vegetales. El biogás está incluido dentro de la categoría otros primarios, pero se desconoce su contribución total. El aporte principal a la matriz lo realizan los combustibles fósiles con un 86,10%, seguido por 3,89 % proviene de la energía hidráulica, 2,85 % de la nuclear, 0,72 % de la eólica, 0,09 % solar y 0,38 % de otros primarios. Por el otro lado, la matriz eléctrica nacional (año 2020), estuvo conformada en un 61,36 % fósil, 21,68 % hidráulica, 7,46 % nuclear, 7,01 % eólica, 1,00 % solar, 0,94 % hidráulica renovable, una pequeña participación de biomasa con el 0,31 % y del biogás con 0,23 % (CAMMESA, 2020).

En cuanto al sector transporte, en los últimos años, Argentina que se destaca por desarrollar actividades económicas en torno al sector agrícola-ganadero, ha incorporado biocombustibles líquidos de primera generación, siendo esta una industria madura en el país (Acevedo y Cruzate, 2018). La provincia de Córdoba constituye un polo importante de producción, en donde se elabora casi el 70 % del bioetanol a base de maíz, en 3 plantas de las 5 comerciales del país. Según datos del Ministerio de Agricultura, Ganadería y Pesca de Argentina - MAGyP (2019), entre 01/2017 - 05/2019, las ventas internas de bioetanol elaborado a partir de maíz promediaron 46.095 [m³/mes], correspondiente al 51,8% de la producción (48,2% a partir de caña de azúcar), y prácticamente se ha mantenido constante en todo el período analizado.

1.2. El sector eléctrico en la provincia de Córdoba.

En Córdoba existen diversas centrales eléctricas a base de Biomasa (3) (BM) y Biogás (BG) (7) en operación. En la figura 1, se puede observar el año de entrada en operación de cada central y la evolución de la generación eléctrica, hasta abril del 2021. La generación de la Central Térmica Las Junturas se ha multiplicado por 100 para que sea notoria en la figura a). En el año 2019 la contribución provincial de la BM y del BG fueron 0,98 % y 0,41 %, respectivamente (114 [GWh/año]). Por su parte a nivel nacional, la generación acumulada a partir de BM y BG fue de 554 [GWh/año], representando el 0,41 % del total generado en 2019 (CAMMESA, 2019).

El funcionamiento de las centrales cordobesas se basa en la combustión de cáscara de maní (Residuo Agrícola Industrial) para el caso de la BM, y la biodigestión de vinaza o silaje de maíz, estiércol ganadero, residuos orgánicos, agroindustriales o desechos de granjas productoras de carne o lácteas y frigoríficos, para el BG. La bioenergía en Córdoba se centra en cultivos energéticos, o en el aprovechamiento de biomasa residual húmeda, sin embargo, prácticamente no se contempla la utilización de otros tipos de biomasa derivados de la actividad agrícola: como los Residuos Agrícolas de Cosecha (RAC).

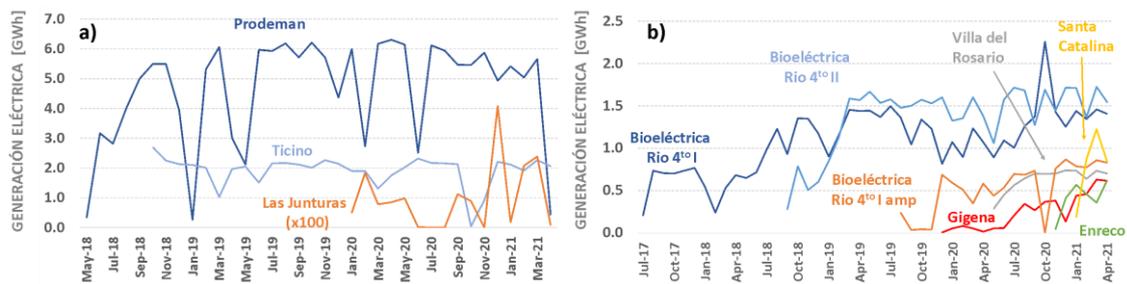


Fig. 1: Evolución de la generación eléctrica proveniente de las plantas de a) BG y b) BM de la provincia de Córdoba.

1.3. Uso sustentable de los RAC de soja y maíz.

El uso principal de los RAC es la protección del suelo. Esto implica dejarlos en el campo, ya que contribuyen a la conservación, la estructura y calidad del mismo, limitando su erosión por el viento y/o agua y manteniendo los niveles de carbono orgánico (Muth y Bryden, 2013); en menor escala se utilizan como recurso forrajero animal (Menéndez y Hilbert, 2013). Muchos países tienen incorporado como práctica habitual la quema de residuos en el campo, como parte de los preparativos para el siguiente ciclo de producción. Esto tiene impactos negativos sobre la biota del suelo, disminuye su fertilidad y provoca emisiones adicionales de Gases de Efecto Invernadero (GEI), además de desaprovechar recursos que

podrían utilizarse para la producción de energía (FAO, 2014). Se estima que, en los países en desarrollo, el 10% de los campos es quemado después de la cosecha (FAO, 2014). Adicionalmente otros criterios relacionados con las emisiones pueden ser considerados, dado que los residuos agrícolas que se descomponen, emiten menos CO₂ que en el caso de que estos fueran quemados para obtener energía (Booth, 2018).

Si no se realizan actividades ganaderas, el aprovechamiento racional de los RAC puede venir de la mano de la utilización del excedente como materia prima para usos bioenergéticos. La remoción y usos de RAC debe ser sostenible (Muth y Bryden, 2013), sin poner en riesgo la calidad y productividad

del suelo a largo plazo, manteniendo niveles óptimos de materia orgánica en el mismo, y además ser viable económicamente (Sahoo et al., 2018).

1.4. Herramientas SIG en el análisis del potencial de uso de biomasa

En los últimos años, se han reconocido los beneficios de la aplicación de las herramientas que albergan los Sistemas de Información Geográfica (SIG), para el mapeo del potencial de biomasa. Los SIG brindan información valiosa con respecto a la distribución espacial del recurso, por un lado, pero es posible también agregar la optimización de plantas de producción de bioenergía (Lovrak et al., 2020) y su localización óptima. Existen diversos estudios en los que se evalúa el uso de rastrojos para aprovechamientos bioenergéticos, en los cuales se los cuantifica y geo-localiza en un entorno SIG (Sultana y Kumar, 2012; Sahoo et al., 2018, Muth y Bryden, 2013; Beccali et al, 2009; Haddad y Anderson, 2008; Höhn et al, 2014; Lovrak et al, 2020; Noon y Daly, 1996; Smyth et al, 2011).

En particular, en Argentina, hay antecedentes de estudios de aprovechamiento de RAC, entre ellos, el trabajo de Menéndez y Hilbert (2013), en el que se cuantifica y analiza la viabilidad del aprovechamiento de los RAC de maíz y trigo para la Zona Núcleo Norte y Sur de Córdoba y la región Centro Sur de la provincia de Buenos Aires. En dicho trabajo se establece la necesidad de retener una parte de los RAC para preservar la salud del suelo, sin embargo podría removerse un porcentaje, estudiando las condiciones específicas de cada lugar. Por su parte, Mónico y Di Leo (2009) valoraron la energía que potencialmente se puede obtener de rastrojos de los 15 cultivos más importantes de Argentina; Crespi y Pugliese (2018) evaluaron la disponibilidad de rastrojos del departamento Río Cuarto-Córdoba, para determinar la superficie necesaria de cobertura del mercado eléctrico, en un marco de sustentabilidad del sistema; por su parte, Acevedo y Cruzate (2018) describen el potencial del residuo de cosecha de maíz para producir bioetanol lignocelulósico en el país. Sin embargo, no se ha detectado un estudio sistemático de la potencialidad bioenergética de los RAC en todo el territorio de la provincia de Córdoba, utilizando un SIG. El entorno SIG es utilizado en este trabajo geo-localizando

recursos, elaborando mapas en formato *raster*, con alta resolución espacial lo que permite un análisis integral y creciente de las variables intervinientes.

2. METODOLOGÍA

A partir de la delimitación del área de estudio, se recogen datos de superficie sembrada de soja y maíz que se asocian a píxeles georreferenciados. La información de cada pixel se codifica siguiendo el modelo de García et. Al (2019). Se elaboran y calculan parámetros relevantes como: el rendimiento de un cultivo, R , el Factor de Residuo FR , la eficiencia del proceso de siembra/cosecha (η), la producción anual provincial de RAC para el cultivo k , M_k . Para completar el diseño del modelo, se realizan diversos geoprocursos con uso del Software Q-GIS (2021), Versión 3.16.

2.1. Área de estudio.

El estudio abarca la provincia de Córdoba, la cual se encuentra ubicada en la región centro de Argentina, y se divide en 26 unidades administrativas, llamadas departamentos.

2.2. Área sembrada con soja y maíz.

En 2019, García et al. presentaron un estudio de coberturas de suelo de la provincia de Córdoba (correspondiente al período 2017/2018), discriminando su superficie en 27 categorías, entre las cuales se encuentran diversas coberturas naturales y antrópicas. Entre estas últimas se hallan las coberturas de soja y maíz, principales cultivos de la provincia. El estudio reúne la información en un mapa en formato raster, con resolución de $7,5 \times 10^{-4}$ [km²] (tamaño del pixel = 25 [m] x 30 [m]). El modelo de datos raster es una representación de un área o región como una superficie dividida en una cuadrícula de celdas (Bajjali, 2018) llamadas píxeles. Teniendo en cuenta que la superficie total de la provincia de Córdoba (estimada con herramientas del propio SIG) es aproximadamente 164.759 [km²], el SIG codifica en poco menos de 220 millones de píxeles el detalle de cobertura para cada categoría. Cada pixel se encuentra georreferenciado.

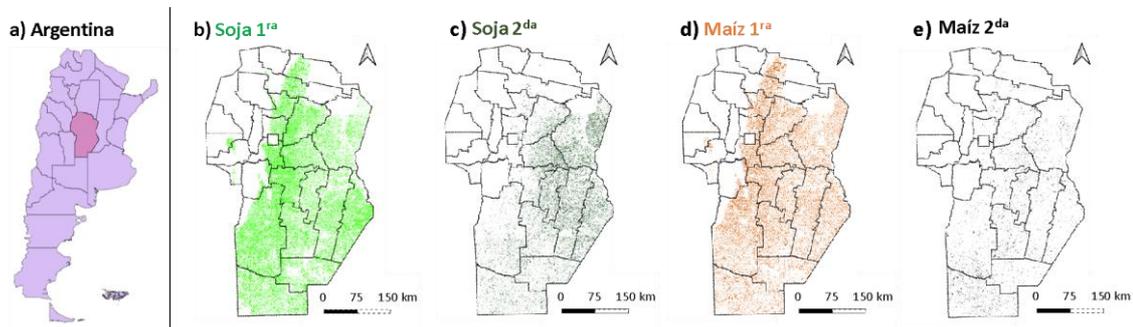


Fig. 2: Mapa temático mostrando a) la ubicación de la provincia de Córdoba-Argentina y las áreas sembradas. b) y c) soja de: 1ª, 2ª, y d) y e) maíz de: 1ª y 2ª.

A partir del modelo de García et. al, y para ambos cultivos mencionados, se extrajeron rasters binarios $\Gamma_{k,i}$ (con $k =$ soja/maíz, e $i = 1, 2, 3 \dots N$, siendo N el número total de píxeles), que codifican la información de cada región, de forma tal que si su valor es 1 el pixel corresponde a esa categoría; si su valor es 0 no corresponde. La figura 2 muestra

los límites políticos de la provincia de Córdoba, y las áreas sembradas con soja (figura 2b y 2c) y maíz (figura 2d y 2e), correspondientes a la campaña 2017/2018. De dicha figura se desprende que el 44,4 % de la superficie provincial se destinó a la siembra de soja y maíz. Dado que estos cultivos son estacionales, se pueden realizar distintas siembras en una misma campaña, dando origen a los cultivos llamados de

primera y segunda. Para el caso particular de la soja, que es un cultivo de verano, su siembra ocupó una superficie de 50.203 [km²] (30,5 %); este valor incluye 37.902 [km²] y 12.301 [km²] de primera y segunda, respectivamente. El caso de maíz, presenta un área total de siembra de 22.847 [km²] (13,9 %) de los cuales 20.619 [km²] y 2.228 [km²], son de primera y segunda, respectivamente.

2.3. Disponibilidad de Residuos Agrícolas de Cosecha.

El rendimiento de un cultivo, R , es un aspecto relevante para transformar las variables binarias $\Gamma_{k,i}$ (pixel) en datos de producción en unidades de masa. R es función de múltiples parámetros entre los cuales se puede mencionar: tipo de cultivo, cronograma de siembra, método y densidad de siembra, características fisicoquímicas y biológicas del suelo, geolocalización, condiciones climáticas imperantes en la campaña (temperatura, radiación, precipitaciones, entre otras), variaciones tecnológicas (nuevos híbridos, uso de

herbicidas y fertilizantes, sistemas de labranza, sistemas de riego) y políticas en cuanto al manejo del ambiente, etc. (Giayetto et al., 2012; Cicchino, 2016; Ortiz et al., 2005; Tolck et al., 1998; Rivetti, 2007; Andrade, 1998). A los fines de ejemplificar su variación temporal, la figura 3 muestra el rendimiento de cosecha ponderado correspondiente a las 11 campañas comprendidas entre 2008 y 2019 (Bolsa de Cereales de Córdoba - BCCBA, 2020).

Córdoba es una provincia extensa en superficie, en donde los factores climáticos y ambientales varían de forma sustancial. Esta característica hace necesario considerar la variación interdepartamental, incluso dentro de una misma campaña. En otras palabras, es necesario considerar la variación espacial y temporal. La Tabla 1 muestra el valor de R para los 26 departamentos de la provincia de Córdoba, para el caso particular de la campaña 2017/2018 (BCCBA, 2020).

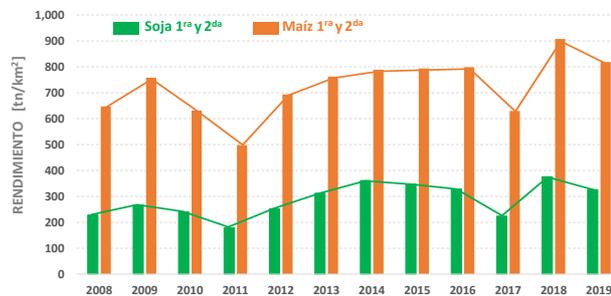


Fig. 3: Evolución del rendimiento medio ponderado por área sembrada en [tn/km²] de cultivo de a) soja y b) maíz para el período comprendido entre 2008 y 2019. Elaboración propia a partir de los datos extraídos de (BCCBA, 2020).

Tabla 1: Rendimiento del cultivo por departamento para la campaña 2017/2018 de la provincia de Córdoba.

Departamento	Soja	Maíz	Soja	Maíz	Departamento	Soja	Maíz	Soja	Maíz
R [tn/km ² /año]		η		R [tn/km ² /año]		η			
Calamuchita	340	640	0,88	0,94	Río Cuarto	190	530	0,89	0,71
Capital	180	630	0,79	0,94	Río Primero	140	490	0,89	0,80
Colón	150	500	0,94	0,73	Río Seco	120	510	0,87	0,81
Cruz del Eje	0	0	-	-	Río Segundo	190	650	0,94	0,77
Gral. Roca	250	640	0,87	0,90	San Alberto	190	710	0,97	0,72
Gral. San Martín	180	640	0,89	0,60	San Javier	370	640	1,00	1,00
Ischilín	90	450	0,50	0,44	San Justo	210	570	0,84	0,55
Juárez Celman	210	640	0,80	0,71	Santa María	180	650	0,76	0,98
Marcos Juárez	330	960	0,92	0,91	Sobremonte	0	0	-	-
Minas	0	0	-	-	Tercero Arriba	190	650	0,93	0,83
Pocho	100	400	0,96	0,76	Totoral	130	540	0,87	0,73
P. R. Sáenz Peña	260	730	0,84	0,80	Tulumba	110	500	0,92	0,83
Punilla	0	450	1,00	1,00	Unión	300	820	0,90	0,80

Por su parte, el Factor de Residuo, FR , es la relación entre los rastrojos y el rendimiento, constituyendo la proporción de biomasa aérea que no es grano o el órgano que se cosecha del cultivo. El FR se puede calcular a partir del Índice de Cosecha (IC), mediante la relación $FR = (1 - IC) / IC$.

El valor del IC es dependiente del tipo de semilla, fecha de siembra, condiciones ambientales durante el ciclo de crecimiento (principalmente la radiación y temperatura),

calidad del suelo y disponibilidad de nutrientes, condiciones de riego, adversidades biológicas (plagas y enfermedades) y otras relacionadas con las prácticas de manejo (Andrade, 1998). Diferentes autores han registrado valores de IC_{soja} e $IC_{maíz}$ comprendidos entre [0,20-0,72] y [0,30-0,70], respectivamente (Haro et al., 1999; Vega et al., 2000; Rivetti, 2007; Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria - INTA, 2015). A los fines exploratorios, en el presente trabajo se

utilizarán valores medios de estos registros: $IC_{soja} = 0,60$ y $IC_{maíz} = 0,50$. Una aproximación similar ha sido utilizada por Menéndez y Hilbert (2013).

Los RAC no son cuantificados directamente por los organismos e institutos públicos, ni por los agricultores (Sultana y Kumar, 2010). Su producción se determina indirectamente, a partir de la masa total cosechada de grano. Desde el punto de vista teórico, es posible estimar los RAC a partir de R y FR de cada tipo de cultivo y en cada región. En adición, para vincular el área sembrada, obtenida del SIG para la campaña 2017/2018 y los RAC, es necesario considerar la eficiencia del proceso de siembra/cosecha (η) para cada tipo de cultivo. η considera las pérdidas del área sembrada que no pudieron ser cosechadas por diversos factores, por ejemplo: inundaciones parciales, zonas no accesibles con la maquinaria, pérdidas generales, entre otras. También debe descontarse el porcentaje de humedad (h) de los RAC. En la Tabla 1 se presenta el valor de η para cada tipo de residuo y cada departamento utilizando en este análisis. Se consideró un porcentaje de pérdida de humedad (en masa) del 14 % para todos los cultivos y departamentos (Sultana y Kumar, 2010).

La producción anual provincial de RAC para el cultivo k , M_k , puede ser estimada de acuerdo a la siguiente expresión:

$$M_k = \sum_{j=1}^{26} m_{k,j} \quad (1)$$

donde $m_{k,j}$ corresponde a la masa de RAC disponible para el departamento j . La sumatoria es extendida en los 26 departamentos de la provincia de Córdoba (ver figura 2). $m_{k,j}$ es computada de acuerdo a la siguiente relación:

$$m_{k,j} = a \sum_{i=1}^{N_j} \left[\Gamma_{k,i} \times \eta_k \times (1-h) \times R_{k,j} \times FR_k \right] \quad (2)$$

donde $\Gamma_{k,i}$ es el vector binario (que puede tomar valores de 0=desocupado, 1=ocupado) georreferenciado asociado a la siembra del cultivo k del píxel i , (figuras 2b-d); N_j corresponde al subconjunto de píxeles incluidos dentro del departamento j . El resto de las variables fueron establecidas párrafos arriba. Para estos últimos, se introdujeron los subíndices k y j para explicitar la dependencia del tipo de cultivo y del departamento, respectivamente. $a = 7,5 \times 10^{-4}$ [km²] y corresponde al área del píxel.

A los fines de procesar la información de acuerdo a las ecuaciones (1) y (2), fue necesario realizar diversos geoprocursos para la construcción del modelo, dentro del entorno del paquete de Software Q-GIS (2021), Versión 3.16, los cuales se detallan a continuación.

2.4. Variación espacial de la biomasa residual: Categorización de los píxeles de acuerdo a sus valores de RAC por departamento.

La categorización consiste en asignar a cada píxel su valor de masa de RAC correspondiente, tanto para soja como para

maíz, dependiendo del departamento al cual pertenece. Para ello, se partió de la capa vectorial de “Departamentos” de la provincia, del Geoportal de IDECOR (Infraestructura de Datos Espaciales de la Provincia de Córdoba, 2018), a la cual se le añadió la información de $m_{k,j}$ por departamento. Luego se transformó dicha capa en un raster, mediante la herramienta “rasterizar” del Q-GIS, y se la multiplicó por el raster binario extraído, mencionado anteriormente, utilizando la calculadora raster. Esto se llevó a cabo para clasificar el poder bioenergético a partir de los RAC por departamento. El emergente fueron dos mapas rasters: uno de RAC de soja y otro de RAC de maíz. En la figura 4b se muestra un ejemplo del proceso de categorización, en donde se han marcado con diferentes colores (solo a los efectos visuales), los píxeles correspondientes a cada departamento, para el caso particular del maíz de primera y segunda.

2.5. Clusterización de las áreas sembradas.

El proceso de clusterización consiste en agrupar aquellos píxeles vecinos conectados, que pertenecen a la misma categoría, es decir poseen el mismo valor de $\Gamma_{k,i}$, dando como resultado polígonos vectoriales. Para ello se utilizó el geoprocuro “poligonizar” incluido en el Software Q-GIS. Las figuras 4b y 4c muestran un ejemplo del proceso de clusterización de los píxeles para el caso particular del maíz de primera y segunda, para el extremo norte del departamento de Río Cuarto-Córdoba. Como se puede observar de las figuras 4c y 4d, las parcelas sembradas contiguas se agrupan en clústeres, formando un único elemento vectorial.

2.6. Centro geométrico y área encerrada.

Se calculó el centro geométrico de cada clúster (puntos negros en la figura 4d) y el área encerrada por el polígono generado, utilizando los geoprocursos “Centroides” y “Agregar atributos de geometría” incluidos en el Software Q-GIS.

Los geoprocursos antes mencionados permitieron reducir el número de elementos a tratar. El número de píxeles iniciales para soja y maíz fueron de 66.323.456 y 30.183.706, respectivamente. El número de clústeres obtenido luego de los geoprocursos fueron de 37.896 y 37.933 para soja y maíz, respectivamente. Esta reducción del número de variables, permite una mayor flexibilidad y rapidez del modelo. Se debe aclarar que la información georreferenciada se encuentra codificada en el centro geométrico del polígono, conteniendo además el área de siembra. Los histogramas de las áreas para cada clúster (no mostrados aquí), siguen una distribución del tipo exponencial decreciente. La mediana para esta distribución (50% de los datos) fue de 62.562 [km²] y 198.750 [km²], para soja y maíz, respectivamente.

2.7. Residuos agrícolas de cosecha sostenibles.

Una práctica habitual de las regiones agrícolas del país, consiste en retener parte de los RAC como cobertura sobre el suelo, con el fin de prevenir su erosión, mantener su salud y fertilidad, como se ha mencionado antes. El uso no controlado de los RAC con fines energéticos podría desencadenar en una baja producción de carbono en la materia orgánica del suelo para futuros años (Álvarez y De Paepe, 2019), con todo lo que eso implica. El impacto en la remoción de proporciones crecientes de RAC debe ser evaluado considerando la evolución de la fertilidad química (disponibilidad de nutrientes), física (estabilidad estructural) y biológica (abundancia de lombrices) conforme se utiliza el RAC con otros fines a desmedro de su utilización para conservación del suelo. La utilización de los RAC con fines

energéticos, debe considerar estos criterios de sostenibilidad a largo plazo (Sahoo et al., 2018). En este trabajo se consideró

que solo una pequeña porción de la masa total de RAC, será dispuesta para ser empleada para su revalorización

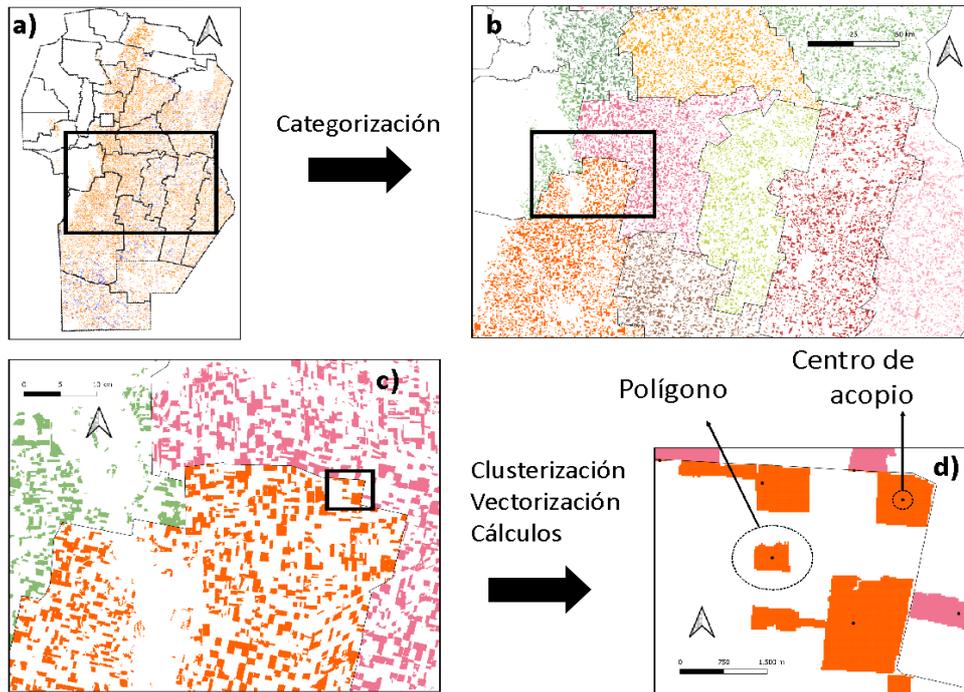


Fig. 4: Mapas temáticos de los geoprocursos. a) mapa de Córdoba conteniendo las áreas sembradas con maíz de 1^{ra} y 2^{da}. b) categorización. c) clusterización. d) cálculos geométricos.

energética. Se denomina a esta fracción de RAC como RAC Sostenibles (RACS). Otros autores recomiendan no remover más del 30% de RAC en la región de la pampa húmeda y semiárida (Álvarez y De Paepe, 2019). Por lo cual, en este trabajo se consideró una disponibilidad del 25% del RAC con fines energéticos.

3. RESULTADOS

La Tabla 2 muestra la disponibilidad de biomasa en [tn/año] que podría ser revalorizada con fines bioenergéticos (RACS)

para soja y maíz, discriminado por departamento para la provincia de Córdoba. La masa total de RACS de soja y maíz es de $M_{soja} = 1.467.885$ [tn/año] y $M_{maíz} = 2.408.024$ [tn/año], respectivamente, dando un total de 3.875.909 [tn/año]. Para el caso de la soja, el 53,0% de la oferta de RACS proviene de 4 departamentos: Marcos Juárez, Río Cuarto, Unión y por último General Roca; para el maíz el 54,4% se produce en los departamentos de Río Cuarto, Marcos Juárez, Unión, General Roca y San Justo.

Tabla 2: Oferta de RACS de soja y maíz, por departamento. Los valores entre paréntesis corresponden al ranking de producción de cada departamento.

Departamento	RACS / [tn/año]		Departamento	RACS / [tn/año]	
	Soja	Maíz		Soja	Maíz
Calamuchita	20.383 (13)	34.421 (16)	Río Cuarto	205.758 (2)	320.526 (1)
Capital	1.252 (21)	2.966 (19)	Río Primero	60.316 (10)	121.593 (10)
Colón	14.471 (15)	34.174 (17)	Río Seco	11.187 (17)	44.073 (15)
Cruz del Eje	0	0	Río Segundo	80.357 (7)	134.447 (8)
Gral. Roca	147.951 (4)	255.307 (4)	San Alberto	2.970 (18)	5.797 (18)
Gral. San Martín	54.384 (11)	74.957 (12)	San Javier	2.635 (19)	2.686 (22)
Ischilín	690 (22)	2.763 (21)	San Justo	138.079 (5)	161.744 (5)
Juárez Celman	79.451 (8)	160.986 (6)	Santa María	24.410 (12)	84.915 (11)
Marcos Juárez	226.045 (1)	306.923 (2)	Sobremonte	0	0
Minas	0	0	Tercero Arriba	76.316 (9)	154.547 (7)
Pocho	2.102 (20)	2.949 (20)	Totoral	18.711 (14)	55.593 (13)
Pte. R. Sáenz Peña	87.972 (6)	132.190 (9)	Tulumba	13.507 (16)	48.619 (14)
Punilla	0	113 (23)	Unión	198.938 (3)	265.703 (3)

La potencialidad bioenergética de los RACS puede ser estimada a partir del Poder Calorífico Inferior (PCI). En una situación similar a la aquí planteada, otros autores consideraron un PCI de 18,6 [GJ/tn] (Lal, 1995). Por lo tanto, la masa total de RACS ($M_{soja} + M_{maíz}$) contiene un potencial energético teórico de 72.091.907 [GJ/año].

Para dimensionar el potencial bioenergético de la provincia de Córdoba, se puede comparar su equivalente bioenergético, con aquel contenido en combustible de origen fósil. El yacimiento "Vaca Muerta", ubicado en la cuenca neuquina, en las provincias de Neuquén, Río Negro, La Pampa y Mendoza, produjo en todo el 2020 un total de 108.717 [m³] de petróleo. Al convertir este volumen a barriles de petróleo, utilizando la equivalencia 1 [bbl] = 0,1589873 [m³] (Ex - MINEM, 1998), se obtienen 683.809 [bbl/año], equivalente a 4,183 x 10⁶ [Gj/año], considerando que 1 bbl es equivalente a 6,1178 x 10⁹ J. La masa de RACS anual, no aprovechada con fines bioenergéticos en la provincia de Córdoba (Tabla 2), contienen 17 veces la cantidad de energía que la producida en todo el año 2020 en Vaca Muerta. Alternativamente, se podría reemplazar la producción de los barriles de petróleo de Vaca Muerta durante 17 años. Al ser la biomasa un recurso de emisiones netas de carbono prácticamente neutra, las ventajas medio ambientales de esa posible sustitución son enormes.

Una posible alternativa para vehiculizar el aprovechamiento de los RACS, consiste en la conversión a pellets y posterior combustión en centrales térmicas para generar electricidad. Asumiendo una eficiencia del 95% (pérdida del 5% del material en masa) en el proceso de densificación de los RACS a pellets (Sultana et. al, 2010), el contenido energético teórico es de 19.024 [GWh/año]. Se consideró un escenario conservador de igualdad de PCI entre RAC y pellets. Se considera 1 [MJ] = 0,277778 [kWh] y un PCI de 18,6 [GJ/tn] (Lal, 1995). Valores típicos de la eficiencia total del sistema energético, para plantas termoeléctricas de biomasa varían entre el [35 – 60] % (Gent et. al, 2018). Considerando una eficiencia media del 45%, comprendida entre estos valores, para la generación eléctrica térmica, el potencial eléctrico teórico obtenido es de 8.561 [GWhe/año]. La demanda eléctrica de Córdoba en todo el año 2019 fue de 9.669 [GWhe/año] (CMMESA, 2019), por lo que la revalorización energética de los RACS tiene el potencial de abastecer el 89% de la demanda eléctrica anual de toda la provincia de Córdoba.

Una consideración final, es que el presente análisis fue realizado para la campaña 2017/2018, la cual en términos históricos (ver figura 3) no se corresponde a una buena campaña para la soja y el maíz, ya que en ese año las precipitaciones fueron escasas, y el rendimiento medio provincial estuvo por debajo de la media histórica. Este escenario corresponde a uno del tipo conservador. Por ejemplo, para la campaña 2018/2019, el rendimiento medio provincial aumentó el 32%, lo que podría implicar un aumento directo del mismo orden en la oferta de RACS (según la Ec. 2).

4. CONCLUSIÓN

Los residuos agrícolas de cosecha constituyen una abundante fuente de biomasa renovable, siempre que se utilicen de forma sostenible. Para ello es preciso dejar una fracción importante que cubra y proteja al suelo. La provincia de Córdoba posee una gran cantidad de este residuo que no es

aprovechado en la actualidad y que tiene una alta potencialidad bioenergética. En este trabajo, se mostraron los primeros pasos hacia la elaboración de un modelo integral que permita evaluar la potencialidad bioenergética de una región, que es transferible a otras y extensible a otros tipos de biomasa. Los primeros resultados se enfocaron en la provincia de Córdoba y en los RACS devenidos de la soja y el maíz. La masa total de los RACS alcanzó las 3.875.909 [tn/año]. El contenido energético teórico permitiría satisfacer el 89% de la demanda eléctrica anual de toda la provincia de Córdoba. Notablemente el contenido energético de los RAC es 17 veces de aquel contenido energético de la producción anual del yacimiento Vaca Muerta en el 2020. Esto demuestra a las claras, la potencialidad de la provincia de Córdoba, en cuanto a transformarse en una región productora de energía renovable proveniente de la biomasa.

Como se mencionó anteriormente, los RAC cumplen una importante función para preservar la estructura y fertilidad del suelo, previniendo de esta forma su erosión. Por ello es imperante que su utilización con fines bioenergéticos considere criterios de sostenibilidad a largo plazo. En este trabajo se planteó solo remover una pequeña porción de la masa total de RAC (25%) para su revalorización energética (RACS), de acuerdo a recomendaciones de estudios locales. Se asumió un escenario conservador del 25% de la masa obtenida en la ecuación (2). Aproximaciones similares fueron utilizadas por otros autores en estudios similares en la región.

Existe consenso sobre el papel principal de la biomasa, en el sentido de tener una potencialidad de generación energética reduciendo las emisiones hacia 2030. Sin embargo, el desafío para aprovechar esta oportunidad requiere de definiciones políticas, medidas y acciones en el marco de una planificación sectorial integrada, donde la biomasa con fines energéticos pueda sustituir el consumo de combustibles fósiles promoviendo el desarrollo sectorial, la generación de empleo y el uso racional y eficiente de la energía.

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos a la Secyt-UNC por las siguientes ayudas económicas: 33620180101091CB y 33620190100005CB01. Agradecemos a IDECOR, CMMESA y la BCCBA por brindar los datos aquí utilizados. R.E.Guidó 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, p. 312-326
- Alvarez R. y De Paepe J.L. (2019). Modelling the effects of stover harvest on soil organic carbon in the Pampas of Argentina. *Soil Research*, **57**, 257–265.
- Andrade F.H. (1998). Posibilidades de expansión de la producción agrícola. *Interciencia* **23**, 18-226.
- Bajjali, W. (2018). ArcGis for environmental and water issues, e book, pp 6, Springer Textbooks in Earth Sciences, Geography and Environment, Cham, Switzerland.
- Beccali M., Columba P., D'Albertia V., Franzitta V. (2009) Assessment of bioenergy potential in Sicily: A GIS-based support methodology. *Biomass and Bioenergy* **33** 79–87.
- BCCBA, Bolsa de Cereales de Córdoba. Recuperado de <https://www.bccba.org.ar>. Fecha de consulta: mayo de 2020.

- Booth M. (2018). Not carbon neutral: Assessing the net emissions impact of residues burned for bioenergy. *Environ. Res. Lett.* 13 035001
- CAMMESA. (2019). Compañía Administradora del Mercado Mayorista Eléctrico. Informe Anual 2019. Recuperado de: <https://portalweb.cammesa.com/default.aspx>. Fecha de consulta: 24/05/2021.
- CAMMESA (2020). Compañía Administradora del Mercado Mayorista Eléctrico. Informe Mensual Oferta 12.
- Cicchino M. (2016). Efecto de la densidad de siembra sobre el rendimiento de sorgo granífero en el norte de la Cuenca del Salado. III Simposio Nacional. I Conferencia Internacional de Sorgo. INTA EEA Cuenca del Salado – Argentina. Recuperado de: https://inta.gov.ar/sites/default/files/densidad_de_siembra_y_rendimiento_en_sorgo.pdf. Fecha de consulta: 18 mayo de 2021.
- Crespi Bosshardt R. J. y Pugliese M. A. (2018). Evaluación de la Biomasa para su Transformación Energética. Sesión Plenaria. Congreso Internacional de Recursos Naturales. Tabasco.
- García C.L., Piumetto M., Teich I., Morales H., Kindgard A., Fuentes M.L., Bosio M.J. y Ravelo A. (2019). Mapas de cobertura del suelo de la provincia de Córdoba 2017/2018.
- Giayetto O., Cerioni G., Fernandez E. M. y Morla, F. (2012). Ciencia y Tecnología de los Cultivos Industriales, Año 1 N° 3. INTA Ediciones.
- Gent S., Twedt M., Gerometta C. y Almberg E. Butterworth Heinemann (2017). Theoretical and Applied Aspects of Biomass Torrefaction. For Biofuels and Value-Added Products. An imprint of Elsevier. p 130.
- Haddad M. y Anderson P. (2008). A GIS methodology to identify potential corn stover collection locations. *Biomass and Bioenergy* 32, 1097–1108
- Haro R., Casini C., Rainero H., Salas P., Lovera E. y Peiretti J. (2003). “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”. Recuperado de: <http://ciacabrera.com.ar/docs/JORNADA%2018/1-HARO.pdf> [Fecha de 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, 1–10.
- IDECOR. Geoportal Mapas Córdoba, de la Infraestructura de Datos Espaciales de la Provincia de Córdoba. Recuperado de: <https://www.mapascordoba.gob.ar/#/mapas>. Fecha de consulta: mayo de 2020.
- Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria – INTA. (2015). El cultivo de maíz en San Luis. Información técnica 188. INTA ediciones. Colección recursos.
- International Energy Agency - IEA (2021). Net Zero by 2050. A Roadmap for the Global Energy Sector. Revised version, 76 – 79.
- Lal, R. (1995). The role of residue management in sustainable agricultural systems. *Journal of Sustainable Agriculture*, 5, 51-78.
- Lovrak A., Pukšec T y Duić N. (2020). A Geographical Information System (GIS) based approach for assessing the spatial distribution and seasonal variation of biogas production potential from agricultural residues and municipal biowaste. *Applied Energy* 26 115010.
- Manrique S. (2017). Biomasa con fines energéticos. Recursos, potencialidad y cambio climático, 1ª edición, pp 36-39. edUTecNe, Ciudad Autónoma de Buenos Aires.
- Menéndez J.E. y Hilbert J. A. (2013). Cuantificación y uso de Biomasa de residuos de cultivos en Argentina para bioenergía. Informes técnicos Bioenergía. Año 2 N°4. Ediciones Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria – INTA.
- Ministerio de Agricultura, Ganadería y Pesca de Argentina. Ventas internas (reales y estimadas) de bioetanol producido a partir de caña de azúcar y maíz. Las mismas se destinan para la mezcla con nafta, según lo establecido en el marco de la Ley de biocombustibles. Dirección de Bioenergía - Secretaría de Alimentos y Bioeconomía. Recuperado de: <https://datos.magyp.gob.ar/dataset/ventas-internas-bioetanol-por-tipo-insumo>. Fecha de consulta: 31 de mayo de 2021.
- (EX)Ministerio de Energía y Minería de la Nación (actual Secretaría de Energía). (1998). Balance Nacional de Energía Útil 1998. 7. Tablas de Conversión de Unidades.
- Móntico S., Di Leo N. (2009). Energía Potencialmente Obtenible de los Rastrojos de Cultivos en Argentina. Manejo de Tierras, Facultad de Ciencias Agrarias, Universidad Nacional de Rosario. Recuperado de: <http://unr.edu.ar>. Fecha de consulta: mayo de 2021.
- Muth Jr. D.J. y Bryden K.M. (2013). An integrated model for assessment of sustainable agricultural residue removal limits for bioenergy systems. *Environmental Modelling & Software* 39, 50-69.
- Noon C. y Daly M. (1996). GIS based biomass resource assessment with BRAVO. *Biomass and Bioenergy*, 10, 2-3, 101 – 109.
- 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.
- Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura - FAO. (2014). Bioenergía y Seguridad Alimentaria. Evaluación Rápida (Befs Ra). Manual de Usuario. Residuos Agrícolas y Residuos Ganaderos.
- Ortiz Solorio C. A., Gutiérrez Castoreña M. y Nieves Frausto J. (2005). Estimación de rendimientos de maíz con el método FAO en el ejido de Atenco, Estado de México. *Revista de Geografía Agrícola*, 35, 57-65
- Q-GIS Software. Recuperado de: <https://www.qgis.org/es/site/>. Fecha de consulta: 16 de junio de 2021.
- PANECC, 2017. Plan de Acción Nacional de Energía y Cambio Climático. Versión I (2017). Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sustentable y Ministerio de Energía y Ambiente.
- 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., Templar R., Tschaplinski T. (2006). The Path Forward for Biofuels and Biomaterials. *Science* 311, 484.
- Richard T. L. (2010). Challenges in Scaling Up Biofuels Infrastructure. *Science*, 329, 793-796.
- Rivetti A.R. (2007). Producción de maíz bajo diferentes regímenes de riego complementario en Río Cuarto, Córdoba, Argentina. II. Producción de materia seca”. *Rev. FCA UNCuyo*. Tomo XXXIX. N° 1, 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**, 63–74.
- Secretaría de Energía de la República Argentina (2019). Ministerio de Economía. Balance Energético de la República Argentina.
- Secretaría de Energía. Ministerio de Economía. Mapa yacimiento Vaca Muerta. Recuperado de: <https://www.argentina.gob.ar/economia/energia/vaca-muerta/mapas>. Fecha de consulta: 09 de junio de 2021.
- Secretaría de Energía de la República Argentina (Actualización 2021). Ministerio de Economía. Producción de Petróleo y Gas - desde 2009 - Sesco Web (Tablas Dinámicas).
- Smyth B., Smyth H. y Murphy J. (2011). Determining the regional potential for a grass biomethane industry. *Applied Energy* **88**, 2037–2049.
- Sultana A., Kumar A. y Harfield D. (2010). Development of agri-pellet production cost and optimum size. *Bioresource Technology* **101**, 5609–5621.
- Sultana, A. y Kumar A. (2012). Optimal siting and size of bioenergy facilities using geographic information system. *Applied Energy* **94**, 192–201.
- Tolk J. A., Evett S.R. y Howell T. A. (1998). Evapotranspiration and yield of corn grown on three high plains soils". *Agronomy Journal*, **90**, 447-454.
- United Nations (UN). (2016). Framework Convention On Climate Change. FCCC/CP/2015/10/Add.1 Distr.
- 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.