



Asociación de Universidades
GRUPO MONTEVIDEO



UNIVERSIDAD
DE LA REPUBLICA
URUGUAY

Potencial energético de rastrojos cerealeros

Gabriel Pena ^a, Germán Navarrete ^b, Pedro Curto ^c

^a IIMPI Facultad de Ingeniería Universidad de la República, Uruguay, gabpena@fing.edu.uy.

^b IIMPI Facultad de Ingeniería Universidad de la República, Uruguay, gnavarrete@fing.edu.uy.

^c IIMPI Facultad de Ingeniería Universidad de la República, Uruguay, pcurto@fing.edu.uy.

RESUMEN: Con miras en reducir el aumento de gases de efecto invernadero, el uso de la biomasa como combustible ha sido y es una de las fuentes de energía renovable ampliamente utilizada. Con la finalidad de no competir entre la producción de alimentos y biomasa para energía, el empleo de biomasa residual aparece como una alternativa interesante. En Uruguay, los cultivos con mayor extensión son los de soja, trigo, arroz, cebada cervecera, maíz y sorgo. Estos generan grandes cantidades de biomasa residual, la cual en su gran mayoría es utilizada únicamente como cobertura del suelo. En este trabajo se estudia la disponibilidad de estas biomásas y su potencial energético asociado. Se evalúa su distribución geográfica y evolución temporal. Como principales resultados se destaca la existencia de un potencial energético que ha alcanzado los 100 TJ por año, donde los residuos que se encuentran en mayor cantidad absoluta son los de soja. En términos relativos a la superficie cultivada, los rastrojos de arroz y maíz son los que presentan mejores resultados. En cuanto a la distribución geográfica de estas biomásas, las mayores concentraciones se encuentran en el litoral oeste, principalmente debido a la soja y al trigo. En la zona este y noreste la biomasa disponible es casi exclusivamente de rastrojo de arroz.

PALABRAS CLAVE: residuos agrícolas, combustión de biomasa, cultivos cerealeros, energía renovable, potencial energético, geolocalización.

1 INTRODUCCIÓN

La biomasa es una fuente de energía renovable y sustentable, la cual es formada continuamente a partir de la interacción de CO₂, aire, agua, suelo y luz solar con las plantas y animales. Cuando la biomasa es quemada, o utilizada luego de ser convertida en otro tipo de combustible, el carbono de la biomasa reacciona con el oxígeno del aire generando CO₂, que se libera a la atmósfera. Si se quema completamente, la cantidad de CO₂ generado es igual a la que adquirió la planta en su crecimiento. En otras palabras, el dióxido de carbono generado en la combustión de la biomasa no incrementa el CO₂ del planeta, por ello, a grandes rasgos, la biomasa es neutra en emisiones de gases de efecto invernadero. Esto no es estrictamente correcto al considerar el ciclo de vida completo de la biomasa (siembra, cosecha, transporte, etc.), pero es claro que presenta ventajas considerables comparada con combustibles fósiles (Basu, 2010; Saidur et al., 2011).

Comparado con otras fuentes de energía renovable, como la energía solar o eólica, la biomasa no tiene problemas de almacenamiento, dado que la biomasa es energía almacenada en si misma. A partir de la biomasa pueden ser generados otros tipos de combustibles sólidos, líquidos y gaseosos o directamente energía térmica y/o eléctrica (Saidur et al., 2011).

Dentro de la gran variedad de cultivos que hay en Uruguay, este trabajo se centrará en los cultivos cerealeros de mayor actividad en Uruguay. Estos presentan una distribución temporal complementaria durante gran parte del año. Debido a que por un lado, en otoño-invierno se dispone de la biomasa cosechada proveniente de los cultivos de verano como maíz, sorgo, arroz y soja, y

en primavera-verano, los rastrojos generados en la cosecha de cultivos de invierno como trigo y cebada.

El principal residuo de los cultivos cerealeros es la biomasa aérea, denominada rastrojo. Actualmente, la mayor parte de esta biomasa se destina como cobertura de suelo. Antes de establecerse las medidas contra incendios en los ámbitos rurales, la quema de rastrojos era un procedimiento relativamente frecuente. Algunos usos de los rastrojos, aunque minoritarios, son la obtención de papel, glucosa, fabricación de tableros, aislante y material de relleno para la construcción, empleo como abono, agente de aireación y/o fuente de carbono para el compostaje de residuos pastosos o excesivamente ricos en nitrógeno. Otro uso a destacar es su empleo como combustible.

En el presente trabajo se estudia la disponibilidad y el potencial energético de la biomasa aérea residual de los principales cultivos cerealeros del Uruguay, evaluando su evolución temporal y la distribución geográfica.

2 METODOLOGÍA

2.1 Biomasa residual y su disponibilidad

Las biomásas seleccionadas para el estudio son los rastrojos de los principales cultivos cerealeros del Uruguay (tanto por su extensión como producción): arroz, soja, trigo, maíz, cebada cervecera y sorgo.

Dado que el grano es la fracción de interés del cultivo, se registra anualmente y regionalmente su producción total y rendimiento, así como la superficie cultivada de cada uno (DIEA, 2012, 2016). No se cuenta con un relevamiento de la biomasa residual que generada. Por lo tanto, para su estimación se debe emplear el índice de cosecha (IC) de cada cultivo.

En los cultivos de granos, se define el IC como el cociente, entre la masa de grano cosechado (m_{Grano}) y la masa aérea total del cultivo (biomasa aérea total – BAT), ambos en base seca. Este índice nos permite cuantificar la producción o rendimiento de biomasa residual (rendimiento de rastrojo - $RTO_{Rastrojo}$) de cada cultivo en función del rendimiento del grano (RTO_{Grano}) y por lo tanto estimar la producción de biomasa residual por hectárea. En las Ecuaciones 1 y 2 se presenta el IC y su empleo para calcular el rendimiento y la producción de rastrojo. Los factores que influyen en el IC son el contenido energético y proteico de las semillas, las temperaturas extremas (altas o bajas) durante el desarrollo reproductivo del cultivo, las condiciones climáticas (ecosistema), la fecha de siembra, el grado de madurez en la cosecha (longitud del ciclo del cultivar), el cultivar, entre otras (Amanullah et al., 2016; Bongiovanni, 2001; Fan et al., 2017; Kemanian et al., 2007; Unkovich et al., 2010).

$$IC = \frac{m_{Grano}}{BAT} \quad (1)$$

$$RTO_{Rastrojo} = \frac{1-IC}{IC} RTO_{Grano} = \frac{Producción_{Rastrojo}}{Superficie sembrada} \quad (2)$$

A efectos del cálculo del rendimiento de rastrojo de cada cultivo, se utilizarán fórmulas y datos de IC presentados en la bibliografía (Amanullah et al., 2016; Bongiovanni, 2001; Fan et al., 2017; Kemanian et al., 2007; Khaliq et al., 2018; Tang et al., 2017; Unkovich et al., 2010), así como valores estimados a nivel nacional. A efectos de estimar el potencial energético, se consi-

dera que no es posible recolectar la totalidad de esta biomasa, ya sea por un tema de capacidad de recolección, así como para dejar parte de la misma en el campo y proteger el suelo de la erosión. De este modo, se contemplará que un 65% del rastrojo total es recogido o cosechado, dejándose en el campo el restante 35%.

A partir de los datos disponibles en el Anuario Estadístico (DIEA, 2016), se estima la disponibilidad de rastrojo utilizable, para cada cultivo, año a año, a nivel nacional. A partir de los datos relevados en el Censo Agropecuario de 2011 (DIEA, 2012), se construyen mapas georeferenciando la distribución territorial de cada cultivo y su densidad energética asociada. La información disponible del censo se nuclea en áreas de enumeración (AE), las cuales corresponde cada una a determinada región del territorio.

2.2 Potencial energético de la biomasa residual

El potencial energético de cada rastrojo se calcula como el producto de su masa seca por el poder calorífico neto (PCN - MJ/kg_{seco}), según los valores presentados en la Tabla 1. Adicionalmente se presentan valores típicos de humedad de los rastrojos y del contenido de cenizas. Cabe destacar que al quedar esparcido el rastrojo en el campo luego de la cosecha del grano, el contenido de humedad del mismo se ve influenciado fuertemente con las condiciones climáticas, además de la humedad inicial al momento de la cosecha del grano (Ortíz et al., 2003).

Tabla 1. Características energéticas de rastrojos cerealeros

Rastrojo	PCN (MJ/kg _{seco})	Humedad (b.h.)	Cenizas (b.s.)	Ref.
Trigo	16,1	9,2	9,2	FSE 2014
Cebada	16,6	8,8	7,4	FSE 2014
Maíz	16,2	27	4,7	FSE 2014
Soja	18,2	9,2	3,8	FSE 2014
Sorgo	15,6	29	7,0	FSE 2014
Arroz	12,5	39	18,7	Este trabajo

De este modo, el potencial energético (PE) y la densidad energética (DE), por superficie cultivada se determinan con las Ecuaciones 3 y 4.

$$PE = Producción_{Rastrojo} \cdot 0,65 PCN \quad (3)$$

$$DE = RTO_{Rastrojo} \cdot 0,65 PCN \quad (4)$$

En base a la información de la superficie cultivada (SC) en cada AE para cada uno de los cultivos, se calcula la densidad energética pero por unidad de superficie total de esa AE (DE'), contemplando así regiones donde no hay cultivo (Ecuación 5). De este modo, se puede estimar, para cualquier superficie arbitraria, el potencial energético de la misma contemplando uno o varios cultivos, los cuales no tiene porque estar cultivados en la misma tierra. La presentación de estos resultados se realiza en mapas de distribución del densidad energética.

$$DE' = \frac{0,65 (SC_i) RTO_{Rastrojo}}{Área_i} \quad (5)$$

3 RESULTADOS

Existe gran diferencia de rendimientos de producción entre los cultivos, así como de superficie cultivada para cada uno de ellos. En las gráficas de las Figuras 1 y 2 se presenta la evolución, a nivel país desde 2009 al 2017, de SC, RTO_{Rastrojo} (65% del total generado), PE y DE.

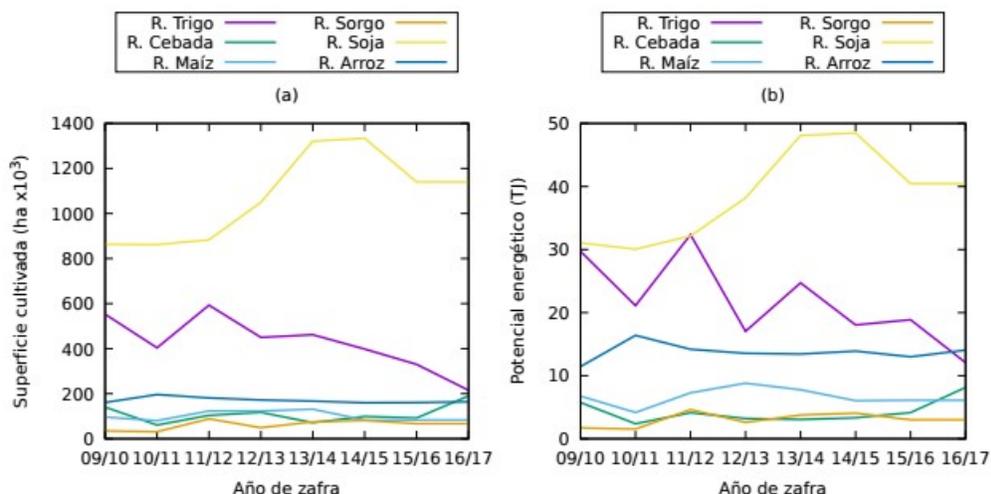


Figura 1. (a) Superficie cultivada por zafra y (b) Potencial energético por zafra

Se observa que en términos absolutos, el rastrojo de soja es el de mayor potencial energético, alcanzando valores de 48 TJ por año en las zafras del 2013-14 y 2014-15, ver Figura 1 (b). Esto se debe a la superficie cultivada con soja (ver Fig 1 (a)) y que el rastrojo de soja presenta el mayor PCN. En orden decreciente continúan los rastrojos de trigo y arroz, con producciones relativamente similares entre ellas, donde el arroz es más estable y el trigo presenta mayores oscilaciones con tendencia a decrecer. En términos energéticos, dado que el PCN del arroz es sensiblemente menor que el del resto de las biomásas, el trigo presenta un potencial energético mayor, el cual alcanzó 32 TJ a principios de la última década, cayendo a 12 TJ en la última zafra con registros. El arroz presenta valores de potencial energético entre 11 y 17 TJ por zafra. En un tercer escalón se encuentran los rastrojos de maíz, cebada cervecera y sorgo. El maíz presenta valores entre 4 y 9 TJ, la cebada cervecera entre 2 y 6 TJ, en último lugar, el rastrojo con menor potencial energético es el sorgo, con valores entre 1 y 4 TJ por zafra. De este modo se totaliza un potencial energético de entre 75 y 100 TJ por año, distribuyéndose entre 60 y 77% a los rastrojos de cultivos de verano y entre 23 y 40% a los rastrojos de cultivos de invierno.

En términos relativos a la superficie cultivada, la disponibilidad de rastrojo y el potencial energético cambia fuertemente respecto a lo observado anteriormente, ver Fig 2. Por unidad de superficie, el arroz es el cultivo que genera mayor cantidad de rastrojo cosechable (5.600-6.800 kg/ha) y a pesar de su bajo PCN también es la bioamsa con mayor densidad energética (70,3-86,5 GJ/ha). Luego se encuentra el maíz (3100-4500 kg/ha / 51,4-73,4 GJ/ha), trigo (2.300-3.500 kg/ha / 37,8-53,5 GJ/ha), sorgo (2.800-3.400 kg/ha / 44,8-52,9 GJ/ha), cebada cervecera (1.600-2.700 kg/ha / 27,3-44,7 GJ/ha) y por último la soja (1.900-2.000 kg/ha / 34,9-36,4 MJ/ha).

La distribución geográfica del potencial energético de estas biomásas se presenta en la Figura 3, donde se representan valores de DE' (GJ/ha) para los cultivos de invierno (trigo y cebada cervecera), cultivos de verano (soja, sorgo, maíz y arroz) y la suma de ambos. Tanto en la suma total como en las fracciones estacionales, la zona con mayor potencial es el litoral oeste, principalmente los departamentos de Soriano y Río Negro, llegando a valores de entre 50 y 55 GJ/ha al año. En estos departamentos, así como en zonas aledañas, los principales cultivos son la soja en

verano y el trigo en invierno. Los cultivos de sorgo, maíz y cebada cervecera se concentran también en el litoral oeste y parte del centro del país, pero con superficies cultivadas sensiblemente menores que el la soja y el trigo. Por ende, su densidad energética por unidad de superficie total considerablemente menor. La disponibilidad de biomasa en el litoral este y noreste se debe al residuo del cultivo de arroz.

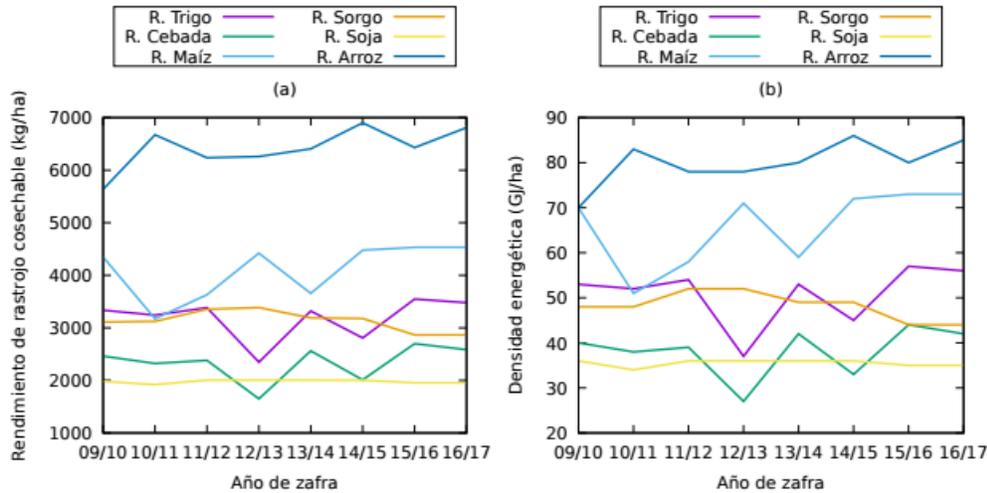


Figura 2. (a) Rendimiento de rastrojo cosechable por zafra y (b) Densidad energética por zafra

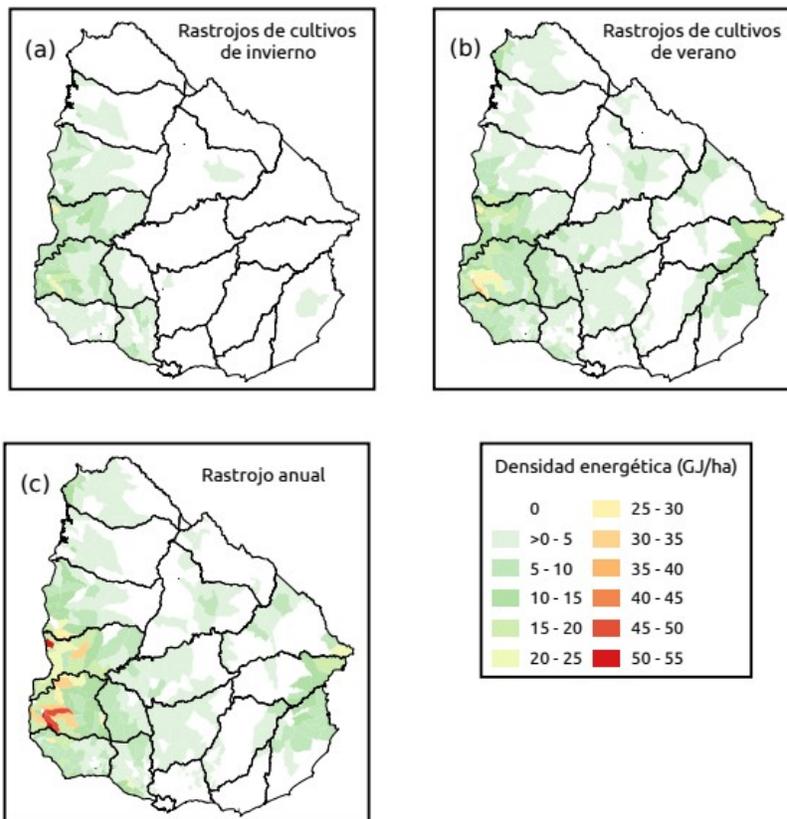


Figura 3. Distribución geográfica del potencial energético de las biomásas. (a) Rastrojos de cultivos de invierno (trigo y cebada cervecera), (b) rastrojos de cultivos de verano (soja, sorgo, maíz y arroz) y (c) rastrojo anual.

4 CONCLUSIONES

Se estudió el potencial energético de cada rastrojo de forma total a nivel nacional, así como la densidad energética por unidad de superficie cultivada y por unidad de superficie de cada región (área de enumeración). Además se identificó las zonas de mayor concentración de cultivos, diferenciándolos también por su estacionalidad. Se destacan los siguientes resultados:

- El rastrojo de soja es el que presenta menor rendimiento y menor densidad energética relativa al área cultivada, pero mayor potencial energético absoluto y densidad energética relativa al área total. El rastrojo queda disponible para utilizarse en otoño-invierno.
- El trigo, cultivo de invierno, se encuentra en segundo lugar en potencial energético absoluto y con buena densidad energética tanto por unidad de superficie cultivada como por unidad de superficie total. Este cultivo también se concentra en el litoral oeste del país.
- El cultivo de arroz es el que genera mayor cantidad de rastrojo por superficie cultivada, pero de mala calidad como combustible. Este cultivo se localiza en la zona este y noreste.
- El maíz, si bien no presenta grandes extensiones de superficie cultivada, es el cultivo con mayor rendimiento de rastrojo (luego del arroz) que se ve reflejado en una muy buena densidad energética por unidad de superficie cultivada. Este cultivo también se concentra en el litoral oeste pero con presencia en el resto del territorio.
- El sorgo y la cebada cervecera presentan potenciales energéticos absolutos bajos debido a que son los que tienen menor superficie cultivada. Sus densidades energéticas por unidad de superficie cultivada son inferiores a las de los rastrojos de arroz, maíz y trigo.

Como trabajo a futuro se propone georeferenciar las industrias que consumen biomasa, para estudiar la viabilidad de sustituir parte de su consumo de biomasa tradicional por una residual.

5 REFERENCIAS

- Amanullah, & Inamullah. (2016). Dry Matter Partitioning and Harvest Index Differ in Rice Genotypes with Variable Rates of Phosphorus and Zinc Nutrition. *Rice Science*, 23(2), 78-87. <https://doi.org/10.1016/j.rsci.2015.09.006>
- Basu, P. (2010). *Biomass Gasification and Pyrolysis: Practical Design and Theory* (P. Basu, ed.). Elsevier Inc.
- Bongiovanni, M. G. (2001). *CRECIMIENTO DE CULTIVARES DE SOJA DE GM III AL VII EN FECHAS DE SIEMBRA DE OCTUBRE A DICIEMBRE, EN VILLA MERCEDES, CAMPAÑAS*. (January).
- DIEA. (2012). *Censo general agropuario 2011* (MGAP, ed.). Recuperado de www.mgap.gub.uy/diea
- DIEA. (2016). *Anuario Estadístico Agropecuario 2015* (M. D. E. G. A. Y. P.-E. A.- DIEA, ed.). Recuperado de www.mgap.cub.uy/diea
- Fan, J., McConkey, B., Janzen, H., Townley-Smith, L., & Wang, H. (2017). Harvest index–yield relationship for estimating crop residue in cold continental climates. *Field Crops Research*, 204, 153-157. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2017.01.014>
- Kemanian, A. R., Stöckle, C. O., Huggins, D. R., & Viegas, L. M. (2007). A simple method to estimate harvest index in grain crops. *Field Crops Research*, 103(3), 208-216. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2007.06.007>
- Khaliq, Q. A., Karim, M. A., Saleque, M. A., Haque, M. M., Karim, A. J. M. S., & Mamun, M. A. A. (2018). Evaluation of different fertilizer management guidelines for boro rice cultivation in south central coastal region of Bangladesh. *Annals of Agrarian Science*, 16(4), 466-475. <https://doi.org/10.1016/j.aasci.2018.05.005>
- Ortíz, L., Tejada, A., & Vázquez, A. (2003). Aprovechamiento de la Biomasa Forestal producida por la Cadena Monte-Industria. Parte III: Producción de elementos densificados. *CIS-Madera*.
- Saidur, R., Abdelaziz, E. A., Demirbas, A., Hossain, M. S., & Mekhilef, S. (2011). A review on biomass as a fuel for boilers. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15, 2262–2289.
- Tang, L., Gao, H., Yoshihiro, H., Koki, H., Tetsuya, N., Liu, T. sheng, ... Xu, Z. jin. (2017). Erect panicle super rice varieties enhance yield by harvest index advantages in high nitrogen and density conditions. *Journal of Integrative Agriculture*, 16(7), 1467-1473. [https://doi.org/10.1016/S2095-3119\(17\)61667-8](https://doi.org/10.1016/S2095-3119(17)61667-8)
- Unkovich, M., Baldock, J., & Forbes, M. (2010). Variability in harvest index of grain crops and potential significance for carbon accounting: Examples from Australian agriculture. *Advances in Agronomy*, 105(1), 173-219. <https://doi.org/10.1016/S0065-21131005005-4>