

Anexo D

Anexo D



Modelos matemáticos para evaluar el potencial energético de la biomasa residual

INTRODUCCIÓN

Los modelos matemáticos para evaluar el potencial energético de la biomasa se fundamentan en que la energía contenida en su materia es proporcional a su masa seca y por consiguiente puede expresarse en forma general como:

$$PE = (M_{rs}) * (E)$$

(Ecuación 1)

Donde:

PE : Potencial energético [TJ/año]

M_{rs} : Masa de residuo seco [t/año]

E : Energía del residuo por unidad de masa [TJ/t]

La energía del residuo es equivalente al llamado Poder Calorífico Inferior⁴ (PCI), cuyas unidades son TJ/t de residuo seco.

Teniendo en cuenta la ecuación 1 y las particularidades de la producción de cada residuo seco de los sectores pecuario, agrícola y de residuos sólidos orgánicos

⁴ El PCI puede obtenerse experimentalmente o teóricamente mediante correlaciones matemáticas (Sheng Ch. y Azevedo J., 2002), ver el anexo glosario del presente documento.

urbanos, a continuación se muestran los modelos de potencial energético aplicados.

1. MODELO DE POTENCIAL ENERGÉTICO PARA EL SECTOR AGRÍCOLA

La forma más adecuada de realizar el aprovechamiento energético de la biomasa agrícola es en procesos termoquímicos (Bhattacharya *et. al.*, 2005; Sordi *et. al.*, 2002).

Para el caso del sector agrícola se debe tener en cuenta que los residuos de la biomasa contienen una porción del producto principal del cultivo, esta fracción normalmente es mayor que la unidad.

Inicialmente el modelo establece la *masa seca del residuo agrícola, por unidad de tiempo*, se puede expresar como:

$$M_{rs} = A * R_c * M_{rg} * Y_{rs}$$

(Ecuación 2)

Donde:

M_{rs} : Masa de residuo seco [t/año]

A: Área cultivada [ha/año]

R_c : Rendimiento del cultivo
[t producto principal / ha sembrada]

M_{rg} : Masa de residuo generada del cultivo
[t de residuo/ t de producto principal]

Y_{rs} : Fracción de residuo seco
[t residuo seco/t de residuo húmedo]

La ecuación (2) aplicada a un tipo de cultivo por residuos se expresa como:

$$M_{RS} = \alpha * A * R_C * \sum_{i=1}^n \sum_{k=1}^m M_{rgki} * Y_{rski}$$

(Ecuación 3)

El valor de α es igual a $1*10^{-6}$ y corresponde a la constante de conversión de unidades.

En la anterior ecuación el contador “k” hace referencia a la clasificación de la biomasa ya sea residual agrícola y/o de cosecha. El contador “i” hace referencia a los tipos de biomasa residual en cada una de las clasificaciones. Por ejemplo, para el cultivo del banano los tipos de biomasa asociados a cada clasificación son:

- a) Residuos agrícolas de cosecha:
 - Raquis
 - Vástago
- b) Residuos agroindustriales:
 - Banano de rechazo

Una vez obtenida la *masa del residuo de biomasa agrícola seca anual*, el potencial energético global de la biomasa residual agrícola (PE_{BRA}), conformada por los residuos de cosecha y agroindustriales para los ocho cultivos del estudio, se evalúa mediante la siguiente expresión:

$$PE_{BRA} = \alpha * A * R_C * \sum_{i=1}^n \sum_{k=1}^m M_{rgki} * Y_{rski} * PCI_{ki}$$

(Ecuación 4)

Donde:

PCI: Poder Calórico Inferior del residuo [TJ/t]

2. MODELO MATEMÁTICO PARA CALCULAR EL POTENCIAL ENERGÉTICO DEL SECTOR PECUARIO

La alternativa difundida para el aprovechamiento de la energía contenida en el estiércol de bovinos, porcinos y aves de jaula se orienta hacia la digestión anaerobia, mientras que para el estiércol de aves con cama (engorde), cuyo contenido de humedad es menor al 60%, la tecnología aplicable es la termoquímica (Murillo, T.; 1999. Sordi *et al.*, 2002).

Con estas referencias se desarrollaron dos modelos; el primero basado en el principio de la digestión anaerobia, y el segundo siguiendo el principio del aprovechamiento energético de la biomasa por la vía térmica.

El modelo de digestión anaerobia se aplicó en el caso de bovinos, porcinos y aves ponedoras, teniendo en cuenta la presencia de altos contenidos de humedad y de microorganismos que facilitan la producción de metano.

El modelo térmico se aplicó en el cálculo del potencial energético de las aves de engorde, en razón a que por sus condiciones de hábitat, éstas producen estiércol con menor contenido de humedad.

2.1 MODELO DEL POTENCIAL ENERGÉTICO EN FUNCIÓN DEL PROCESO DE DIGESTIÓN ANAEROBIA

En este caso la masa de residuo es función directa del número de animales que producen las deyecciones con altos contenidos de sólidos volátiles y humedad. Según su composición, el carbono presente puede llegar a formar metano (Bhattacharya, *et al.* 2005). El modelo corresponde a la siguiente ecuación:

$$PE_{BRP} = \sum_{i=1}^n NA_i * MS_i * SV * Bo_i * PCI_{CH4}$$

(Ecuación 5)

Donde:

PE_{BRP} : Potencial energético biomasa residual pecuaria [TJ / año]

NA: Número de animales [cabezas]

MS: Materia seca [kg MS/cabeza-año]

SV: Sólidos volátiles [kg sv/kg materia seca]

B_o : Producción de biogás [m^3 /Kg SV]

PCI_{CH_4} : Poder calorífico inferior del metano [TJ/ m^3]

El contador “i” hace referencia al grupo etario en cada subsector.

2.2 MODELO MATEMÁTICO PARA CALCULAR EL POTENCIAL ENERGÉTICO DE LA BIOMASA RESIDUAL DE AVES DE ENGORDE

En este caso, la masa de residuo se obtiene de multiplicar el número de cabezas (NA) por la materia seca (MS). El contenido energético de la biomasa corresponde al poder calorífico inferior. La expresión matemática para evaluar el potencial energético es:

$$PE_{BRAE} = NA_e * MS * PCI$$

(Ecuación 6)

PE_{BRAE} : Potencial energético [TJ / año]

NA_e : Número de animales de engorde [cabezas]

MS: Materia seca [kg /cabezas-año]

PCI: Poder calorífico inferior [TJ/kg masa seca]

3. MODELO MATEMÁTICO PARA CALCULAR EL POTENCIAL ENERGÉTICO DE LOS RESIDUOS SÓLIDOS ORGÁNICOS URBANOS

En este sector se desarrollaron dos modelos para evaluar el potencial energético. El primero, basado en el principio de la digestión anaerobia, se aplicó a los residuos que se generan en los centros de acopio y plazas de mercado. El segundo modelo contempla los principios térmicos y se aplicó a los residuos de plaza de mercado.

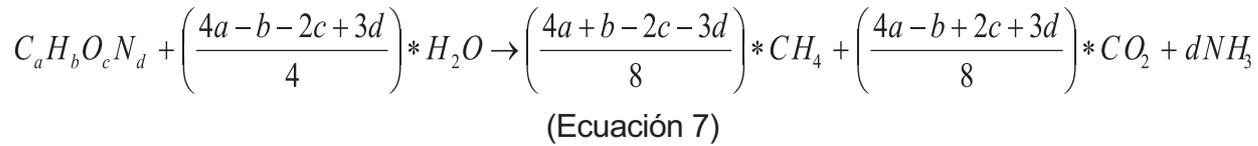
3.1 MODELO PARA RESIDUOS SÓLIDOS ORGÁNICOS URBANOS – CENTROS DE ACOPIO Y PLAZAS

Por su composición química (valores promedio de 0,08 y 0,50 para la fracción de carbono biodegradable y para la fracción de carbono biodegradado como metano respectivamente, según el Intergovernmental Panel on Climate Change –IPCC; 1996), los residuos sólidos orgánicos urbanos, conformados por los residuos de centros de acopio, de plazas de mercado y de poda de zonas verdes, constituyen una fuente orgánica que ha sido empleada para la generación de metano (Jiang, *et. al.*, 2007; Ruzena, *et. al.*, 1998; Kiely, *et. al.*, 1996; Krzystek, *et. al.*, 2001).

La digestión anaerobia, con la cual se obtiene una corriente de biogás rico en metano, ha mostrado excelentes resultados para el tratamiento de los residuos sólidos orgánicos. Teniendo en cuenta lo anterior, el IPCC desarrolló un modelo para calcular el metano generado, el cual se ha utilizado en diferentes estudios para expresar el potencial energético (Bhattacharya, *et al.*, 2005; Perera, *et al.*, 2005; Jiang, *et al.*, 2007). En algunos de estos trabajos el potencial energético de los residuos sólidos orgánicos urbanos se evaluó como una función del metano generado y de su poder calorífico inferior.

Tomando como base los aportes del IPCC y de Bhattacharya *et al.*, (2005), se desarrolló un modelo para calcular el potencial energético

basado en un balance de masa que cuantifica el metano que se genera a partir del carbono en descomposición anaerobia. La reacción global de descomposición del carbono orgánico se



Las constantes a, b, c y d, corresponden a coeficientes estequiométricos.

El modelo considera el metano se colecta sin pérdidas y el amoníaco es muy bajo; por tanto, su aporte al potencial energético es mínimo. La estructura del modelo se define como:

$$PE_{RSOU} = M_{RSOU} * FO * FCB * FCM * \frac{16}{12} * PCI_{CH_4}$$

(Ecuación 8)

Donde:

- PE_{RSOU}: Potencial energético de biomasa de residuos sólidos orgánicos urbanos [TJ/año]
- M_{RSOU}: Masa de residuos sólidos orgánicos urbanos generados [t/año]
- FO: Fracción orgánica de los residuos de rápida biodegradación, expresado como t materia orgánica/t materia total
- FCB: Fracción de carbono de los residuos de rápida biodegradación, expresado como t carbono biodegradable/t materia orgánica de rápida biodegradación
- FCM: Fracción de carbono biodegradado a metano, expresado como t carbono degradado a CH₄/t materia biodegradable
- PCI_{CH₄}: Poder calorífico inferior del metano [TJ/t masa seca]

representa por la ecuación 6 (Tchobanoglous *et al.*, 1998).

El factor 16/12 corresponde a la relación de la masa molar del metano (16 g/g- mol) a la masa molar del carbono (12 g/g-mol) y permite convertir la masa de carbono biodegradado en la masa de metano generado. Las variables FCB, FCM y FO están relacionadas con las propiedades fisicoquímicas de los residuos.

3.2 MODELO PARA RESIDUOS SÓLIDOS ORGÁNICOS URBANOS – PODA

Los residuos de poda presentan valores de humedad y de PCI dentro de los rangos de los residuos agrícolas, por esta razón su potencial energético puede ser evaluado por un modelo matemático definido como el producto entre la masa del residuo (Mr), el factor de residuo seco (Frs) y el poder calorífico inferior del residuo (PCIr). La expresión general es:

$$PE_{BRSOP} = M_r * F_{rs} * PCI$$

(Ecuación 9)

Donde:

- PE_{BRSOP}: Potencial energético de biomasa residual sólidos orgánicos de poda [TJ/año]
- M_r: Masa de residuo [t/año]
- F_{rs}: Factor de masa residuo seco [t residuo seco/t residuo húmedo]
- PCI: Poder calorífico inferior del residuo [TJ/t]

BIBLIOGRAFÍA

Bhattacharya S., Junfeng L., Runqing H., Yanqin S., Jingli S., Salam A. (2005). *Assessment of sustainable energy potential of non-plantation biomass resources in China*. Biomass and Bioenergy 29, pp. 167-177.

Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (1996). Revised – IPCC. *Guidelines for national greenhouse gas inventories*. Reference manual, volume 3, pp. 63 – 65.

Jiang J., Sui J., Wu S., Yang Y., Wan Li. (2007). *Prospects of anaerobic digestion technology in china*. Tsinghua Science & Technology 12, pp. 435 - 440.

Kiely G., Tayfur G., Dolan C., Tanji K. (1996). *Physical and mathematical modeling of anaerobic digestion of organic wastes*. Water Research 31, pp. 534 - 540.

Krzystek L., Ledakowicz S., Hans-Joachim K., Kaczorek K. (2001). *Degradation of household biowaste in reactors*. Journal of Biotechnology 92, pp. 103 - 112.

Murillo T. (1999), *Alternativas de uso para la gallinaza*, XI Congreso Nacional Agrónomo, Conferencia 94, Pecuarios, 1999, pp. 427-436.

Perera K.C.K, Rathnasiri P.G., Senarath S.A.S, Sugathapala A.G.T, Bhattacharya S.C, Abdul Salam P., (2005). *Assessment of sustainable energy potential of non-plantation biomass resources in Sri Lanka*. Biomass and Bioenergy 29, pp. 199–213.

Ruzena G. (1998). *Bioconversion of organic waste by the year 2010: to recycle elements and save energy*. Resources Conservation and Recycling 23, pp. 67-86.

Sheng Ch., Azevedo J. L. T. (2005). *Estimating the higher value of biomass fuels from basic analysis data*. Biomass and Bioenergy 28, pp. 499 – 507.

Sordi A., Souza S. N. M., Oliva C. A. (2002). *Potencial de Energia Primaria de Resíduos Vegetais no Paraná*. Agrener, 4 ° Encontro de Energia no Meio Rural, Campinas, Brasil, pp. 1 – 20.

Tchobanoglous G., Theisen H., Vigil S. (1998). *Gestión Integral de Residuos Sólidos*. Mc Graw Hill/Interamericana de España S.A., ISBN:0-07-063237-5, pp. 755-763.