

Rendimiento de la producción de metano a partir de pulpa y mucílago de café (*Coffea arabica*)



Ing. Joaquín A. Víquez Arias, M.Sc.

VIOGAZ S.A. (www.viogaz.com)
Especialistas en tecnología de biogás
jviquez@viogaz.com
Oficina: 2265-4495

Introducción

El procesamiento de café (*Coffea arabica*) en Centroamérica, en El Caribe, en México, en Colombia y en Venezuela, usualmente, se realiza bajo el método de beneficiado en húmedo, el cual consiste en remover mecánicamente la cáscara y

mesocarpio del fruto de café, incluyendo otros procesos, con el fin de obtener el grano de oro como producto final (Calzada, 1981). Durante el periodo del 2012-2013, el Instituto del Café de Costa Rica (ICAFÉ) reportó una producción total de 2 246 521 fanegas de café, distribuidas entre 130 plantas de beneficiado en Costa Rica (ICAFÉ, 2013).

Durante el proceso de beneficiado se generan una serie de subproductos del 100% de la cereza o fruto del café: 43,6% equivale a la pulpa, 14,9% al mucílago,

17,1% al agua, 4,2% al pergamino, 2,2% a los volátiles y 10,4% a la borra, expresado en % de peso fresco (Cenicafé, 2010).

La pulpa, también conocida como "broza", está compuesta por el exocarpio del fruto, mientras que el mucílago, llamado popularmente como el "gel" del proceso de beneficiado, es el mesocarpio del fruto. Como se mencionó anteriormente, estos suman casi el 60% del total de subproductos del proceso de beneficiado. Se estima que para el caso de la pulpa de café, 2 250 kg de pulpa y 768 kg de mucílago

son generados por cada hectárea de café cultivada al año (Cenicafé, 2010).

Actualmente, el manejo más común de la pulpa y del mucilago, es el tratamiento semiaeróbico por medio del composteo, elaborado por las mismas plantas de beneficiado o empresas que ofrecen el servicio ambiental, como por ejemplo Abonos Vivos en Cartago. En algunas ocasiones y en el caso del mucilago se realiza en los sistemas de tratamiento de aguas residuales, que existen en las plantas de beneficiados.

Como alternativa, los subproductos de la pulpa y del mucilago de café pueden ser anaeróbicamente biodigeridos para su estabilización biológica y, como subproducto, se podría generar biogás rico en metano para ser utilizado como fuente de energía dentro del mismo proceso de beneficiado (Calzada, 1981). Sin embargo, existe limitación de datos serios y confiables, utilizando metodologías estandarizadas para conocer el rendimiento máximo de metano de estos subproductos. Por tanto y en el marco de los Proyectos de Graduación de las estudiantes Lynda Medina y Bethy Jurado de la Universidad EARTH, se realizó el estudio del rendimiento de metano de pulpa y mucilago de café.

Metodología

El estudio se llevó a cabo en la Unidad de Biogás, perteneciente al Centro de Investigación y Desarrollo de Energías Renovables (CIDER) de la Universidad EARTH, ubicada en la zona atlántica de Costa Rica. Los resultados obtenidos de este análisis, se basaron en la metodología VDI-4630 de la Asociación Alemana de Ingenieros (VDI, 2006), la cual se explica en las siguientes secciones:

a. Recolección de las muestras

Se recolectaron muestras compuestas tanto de pulpa como de mucilago de café, provenientes de tres plantas de beneficiado (Coopelibertad, CoopVictoria y La Eva S.A.), las cuales procesan café (*Coffea arabica*) de la variedad

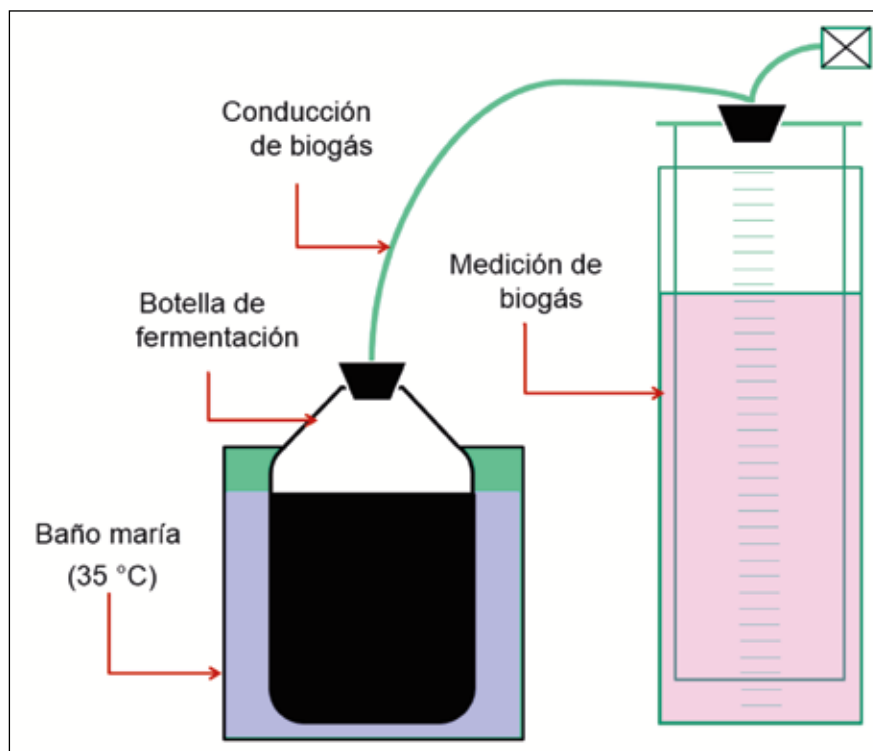


Figura 1. Componentes del experimento para la medición del biogás.

“Caturra”. Dado que Coopelibertad no cuenta con una desmucilagadora, las muestras se recolectaron únicamente en el beneficio La Eva S.A. y en CoopVictoria, en dos ocasiones: durante el pico de cosecha de café (Época A) y por segunda vez hacia el final de la cosecha (Época B). Todas las muestras fueron recolectadas en fresco durante el beneficiado, así como empacadas y refrigeradas inmediatamente a 4 °C, para luego ser conservadas a -25 °C hasta su uso.

b. Metodología VDI 4630

I. Explicación breve:

La metodología VDI- 4630 consiste en colocar sustrato (pulpa o mucilago), mezclado con un lodo anaeróbico (como inóculo), con buena actividad metanogénica en una proporción 2:1 (Lodo: Sustrato) en términos de MoS, que consiste en la porción de la MS (Materia Seca) que se volatiliza a 550 °C. En otras palabras es MS menos cenizas, dentro de una botella de fermentación de 2 000 mL, la cual es colocada en un baño maría a 35 °C, durante un tiempo aproximado de 30-45

días. Cada botella de fermentación es llenada con lodo anaeróbico y sustrato y luego sellada, conduciendo el biogás a unidades de medición de volumen de biogás. Este tipo de fermentación anaeróbica es conocida como en lote, lo que significa que, a diferencia de fermentaciones continuas, esta es discontinua y es alimentada por una única vez. La cantidad de biogás es simplemente medida hasta que el sustrato deje de producir. En la Figura 1, se muestra los componentes del experimento.

II. Lodo anaeróbico

El lodo anaeróbico utilizado fue extraído del fondo del reactor anaerobio de flujo ascendente (conocido por sus siglas en inglés como UASB) de la planta de tratamiento de Coopelibertad. El lodo fue previamente probado por su actividad metanogénica, resultando en una buena producción de metano. Se prefirió emplear lodo de una planta de tratamiento que procesa aguas mieles, pues el mismo está biológica y metabólicamente adaptado al procesamiento de residuos, prove-



Figura 2. Muestra del experimento en operación

nientes de la industria del café. El lodo, con 4,4% de MS (MS) y 63,5% MoS fue colectado y almacenado en un recipiente anaeróbico hasta su uso.

III. Preparación y procesamiento de la muestra

Cada muestra fue descongelada a temperatura ambiente, luego se le removieron las partículas no propias de la misma, como piedras, hojas y tallos, que pudieran afectar el resultado final. Cada muestra, tanto de la pulpa o del mucilago como del lodo anaeróbico, fue sometida a un análisis de MS y MoS.

IV. Arranque de sistema de fermentación

El experimento contaba con tres botellas testigos de fermentación con únicamente lodo anaeróbico. Las muestras, tanto de pulpa como de mucilago de cada planta de beneficiado y tiempo de cosecha, fueron probadas con tres repeticiones. Al final, se tuvo un total de 18 botellas de fermentación para el análisis de la pulpa, 12 para realizar el del mucilago y un total de tres botellas de lodo anaeróbico como testigo.

El sustrato se colocó en cada botella de fermentación, mezclado con el lodo anaeróbico, en una proporción de 2:1 (lodo:

sustrato) en términos de MoS, teniendo cada botella un máximo de 2 kg de mezcla (lodo + sustrato). Las botellas fueron selladas con tapones de hule y debidamente colocadas en el baño maría, a una temperatura de 35 °C. En la Figura 2, se muestra una fotografía del experimento en operación.

V. Toma de datos, procesamiento y análisis

Un vez terminada la instalación del experimento y por un periodo de 30-45 días, se realizaron mediciones diarias de la producción de biogás (en mL), su composición de metano (en % v/v, utilizando un medidor de gases marca Landtech), presión (hPa) y temperatura (°C). Concluido el experimento, todos los datos de producción de biogás fueron normalizados, según la ley ideal de los gases, a mL de metano (CH_4) a 0 °C y 1 013 hPa de presión, así como también se eliminó el contenido de humedad del biogás. A los resultados finales se les realizó un análisis de varianza para la determinación de diferencias estadísticamente significativas ($P < 0,05$), con el programa informático InfoStat®.

Resultados y discusión

En el Cuadro 1, se muestran los resultados promedios obtenidos de los análisis de MS, MoS, pH inicial y final, así como también la concentración de carbono y nitrógeno (expresado en % de base seca) y su respectiva relación carbono:nitrógeno, realizado a las muestras de pulpa y mucilago.

Como se puede observar en el Cuadro 1, la pulpa de café muestra una concentración de MS en el rango de 17,9% a 25,1% y entre 68,2 %_{ds} y 93,5%_{ds} de MoS. Con excepción del valor de MoS del beneficio de café La Eva S.A., durante la época B (68,2%_{ds}), los demás valores son típicos de sustratos orgánicos utilizados para la fermentación anaeróbica y su conversión parcial a biogás (metano). Los valores de MS, aunque altos para uso en reactores anaerobios de mezcla completa (3-8% MS) (Gunaseelan, 1997), pueden ser diluidos mezclados con agua o con sustratos de baja concentración de MS. Por otro lado,

Cuadro 1. Resultados de los análisis de laboratorio de la pulpa y mucílago en estudio

Beneficio de café	Sustrato	Época	MS %	MoS % _{bs}	pH _{inicial}	pH _{final}	%C _{bs}	%N _{bs}	C:N
CoopeLibertad	Pulpa	A	25.1%	93.5%	7.3	7.2	52.2	2.2	23.7
CoopeLibertad	Pulpa	B	19.3%	75.2%	7.2	7.4	40.6	1.4	29.2
CoopeVictoria	Mucílago	A	8.4%	82.9%	7.6	7.4	34.9	1.4	25.3
CoopeVictoria	Mucílago	B	4.0%	85.4%	6.7	7.3	33.3	2.0	16.7
CoopeVictoria	Pulpa	A	17.9%	84.1%	7.0	7.2	45.9	2.5	18.7
CoopeVictoria	Pulpa	B	18.2%	83.3%	7.3	7.2	49.5	2.0	24.3
La Eva S.A.	Mucílago	A	8.2%	86.4%	7.1	7.4	45.5	1.4	32.3
La Eva S.A.	Mucílago	B	9.4%	74.4%	7.0	7.4	43.3	1.4	31.2
La Eva S.A.	Pulpa	A	18.4%	82.4%	7.3	7.2	45.4	2.1	21.9
La Eva S.A.	Pulpa	B	18.5%	68.2%	7.2	7.3	41.3	1.4	29.9

los valores de C:N de la pulpa estuvieron en un rango entre 18,7 y 29,9, los cuales están dentro de un nivel aceptable para la fermentación anaeróbica.

En el caso del mucílago, los rangos de MS se mantuvieron entre 4,0% y 9,4%. Su variabilidad se puede deber mucho al estado de madurez del fruto y a la cantidad de agua empleada en la desmucilagadora al momento de muestreo. Los valores de MoS estuvieron en un rango promedio de 74,4%_{bs} y 86,4%_{bs}, los cuales también se encuentran dentro de los valores típicos de sustratos, aptos para fermentación anaeróbica. Al igual que con el caso de la pulpa, el mucílago tuvo valores de C:N entre 16,7 y 32,3, también dentro de los rangos aceptables para fermentación anaeróbica.

Los pH iniciales y finales mostrados en el Cuadro 1 son el resultado de la medición del pH antes y después del experimento y no directamente del sustrato como tal. Este indicador muestra que el sustrato, en las condiciones del experimento, no reveló efectos de acidificación.

Los resultados de la cantidad de metano normalizado (0 °C y 1013 hPa,) acumulado durante el experimento, para los tres beneficios en las dos épocas (A y B) de la pulpa y del mucílago, se pueden apreciar en las Figuras 3 y 4.

La pulpa de café reflejó, para todos los casos, una fermentación normal anaeróbica, lo que muestra grandes potenciales del uso del sustrato en un reactor en

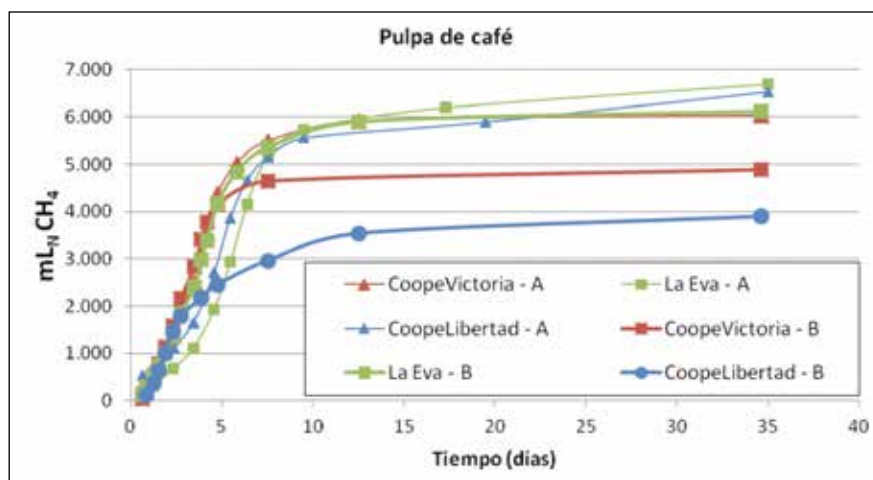


Figura 3. Volumen de metano normalizado, acumulado de la pulpa de café, tanto de la época A como en la B de los tres beneficios

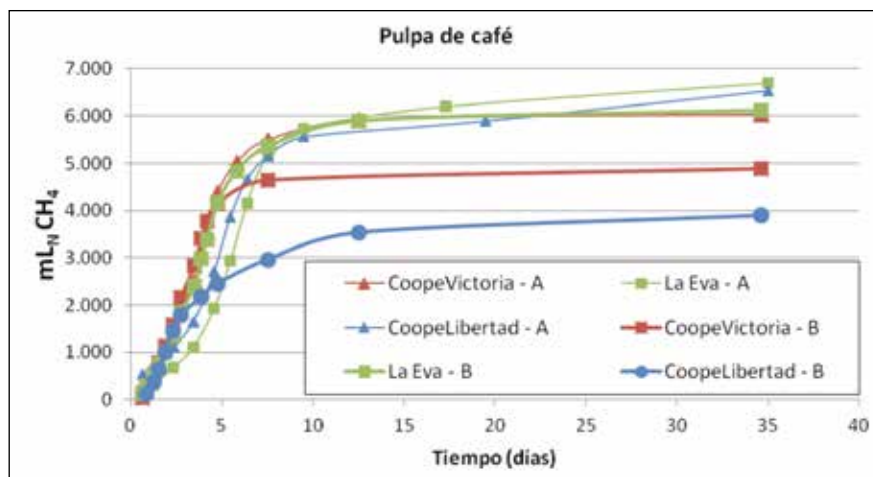


Figura 4. Volumen de metano normalizado, generado por el mucílago de café, tanto en la época A como en la B, de CoopeVictoria y La Eva S.A.

monofermentación (reactor anaeróbico, operando con la alimentación de un solo sustrato).

Como se puede apreciar en la Figura 3, la mayoría de metano es generado en los primeros cinco a ocho días de fermenta-

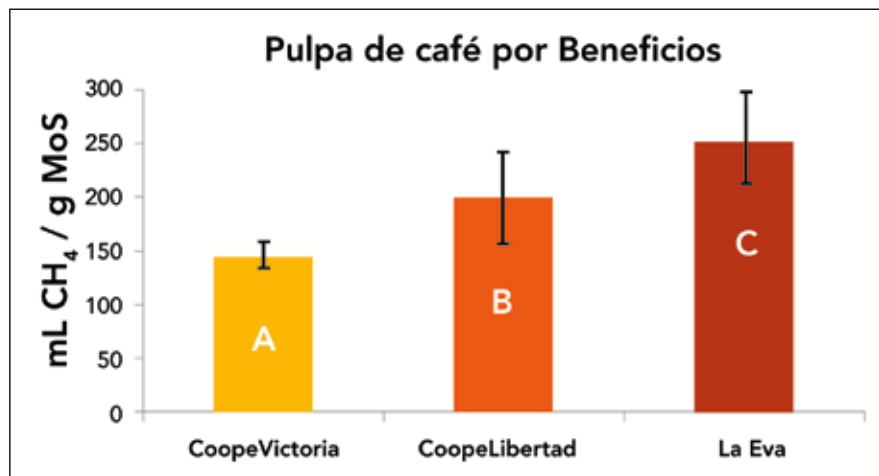


Figura 5. Rendimiento de metano de la pulpa de café promedio para los tres beneficios, sin considerar la época de cosecha

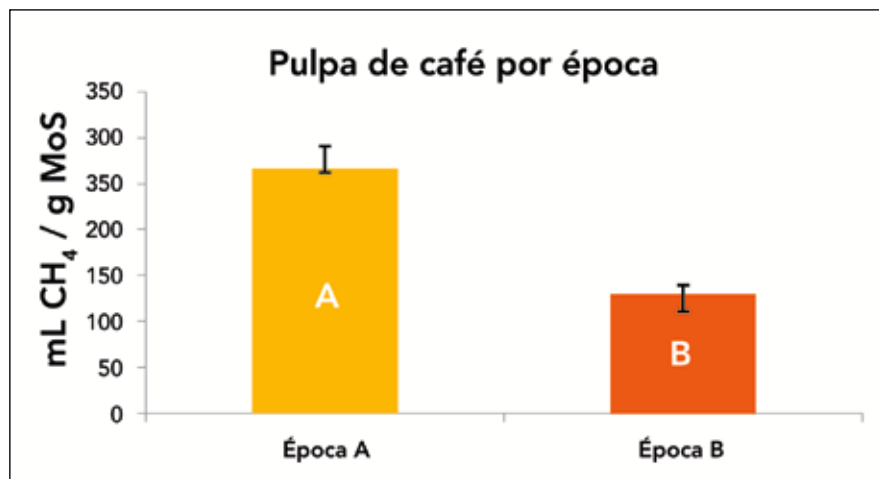


Figura 6. Rendimiento de metano de la pulpa de café promedio, comparando las dos épocas de cosecha

ción y, luego, la curva se vuelve asintótica, lo que significa una estabilización en la producción de metano.

Para el caso del mucílago de café, aunque este alcanza, al igual que la pulpa, un nivel de estabilización luego de 40 días de fermentación, el mucílago presentó una fermentación diaúxica. Este tipo se identifica por un leve aumento en la producción de metano, seguido de una estabilización por unos cuantos días y nuevamente un disparo en la producción de metano. A este efecto también se le conoce como bifásico y se caracteriza por la presencia de dos fuentes de carbono, la primera es fácilmente digerible por los microorganismos que en la segunda fuente es metabolizada; pero, previo a un proceso de adaptación.

Las Figuras 5 y 6 reflejan el rendimiento promedio de metano, expresado como mL normal de metano por cada gramo de MoS, tanto comparativo entre beneficios y por época de cosecha del café. La pulpa muestreada del beneficio La Eva mostró el máximo rendimiento de metano, con $252,6 \pm 81,4$ mL_N CH₄/g MoS, seguido de CoopeLibertad con $199,3 \pm 86,5$ mL_N CH₄/g MoS y finalmente CoopeVictoria con $143,8 \pm 14,8$ mL_N CH₄/g MoS, todos con una diferencia estadísticamente significativa.

Esta diferencia en rendimiento de metano, entre un beneficio de café y otro, puede deberse a muchos factores, como por ejemplo: grado de madurez del fruto, manejo de la plantación y otros. Aunque difícil de de-

terminar los factores ambientales o edafoclimáticos, que influyen en esta variación, lo importante es conocer que efectivamente sí existe diferenciación entre estos beneficios y que toda pulpa no es igual para efectos de producción de metano.

Otros autores han realizado pruebas de rendimiento de biogás de la pulpa y aunque no está clara la metodología utilizada, o si los valores fueron normalizados, se ofrecen algunos datos encontrados en la literatura: (1) (Chacón y otros, 1984), mostró rendimientos de 150 a 196 mL de biogás por kg de MS, (2) (Stainer, 2011) encontró un rendimiento de 380 mL de biogás ($\approx 60\%$ de metano) por kg de MS, (3) la Oficina Federal Suiza de Energía (BFE, s.f.) en un documento sin publicar, presentó valores de 380 mL de biogás, por cada kg de MoS.

Algo interesante que se puede apreciar en la Figura 6, es cómo el rendimiento de metano de la pulpa es mayor en la época A, en comparación la B. Una hipótesis con mayor argumento técnico es la diferencia del grado de madurez del fruto de café, durante el pico y la etapa final de la cosecha, en la que se da un gran porcentaje de café verde.

En las Figuras 7 y 8 se ofrecen los datos referentes al rendimiento del mucílago de café por beneficios y por época.

Para el caso del mucílago, mostrado en las Figuras 7 y 8, de forma muy interesante, no se encontró diferencia significativa entre beneficios, en lo que a rendimiento de metano se refiere, ni tampoco en la época de cosecha. Los rangos de rendimiento de metano estuvieron entre $292,3 \pm 30,2$ mL CH₄/gMoS y $309,2 \pm 31$ mL CH₄/gMoS. Para fines comparativos, no fue posible hallar ninguna referencia confiable en la literatura revisada, respecto a rendimientos de metano del mucílago de café.

Conclusiones

Aunque la metodología VDI 4630 descrita en este estudio, permite la medición de la cantidad máxima de producción de metano en condiciones normalizadas, la misma no entrega resultados para facto-

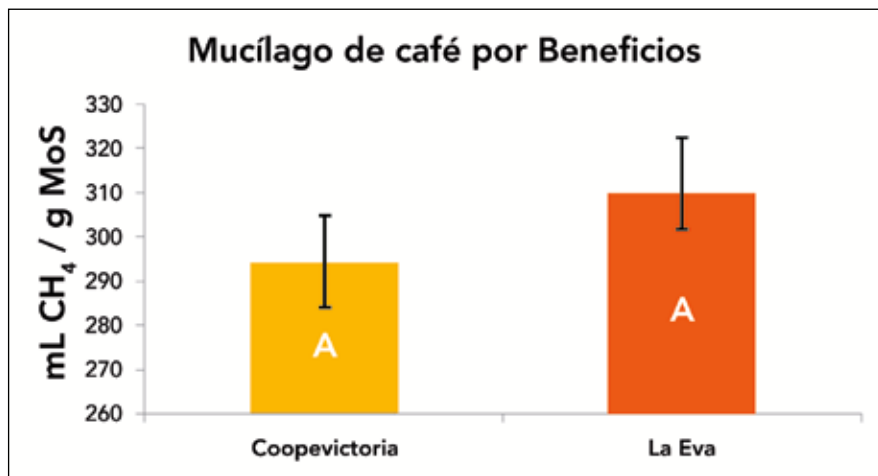


Figura 7. Rendimiento de metano del mucílago de café promedio para dos beneficios sin considerar la época de cosecha.

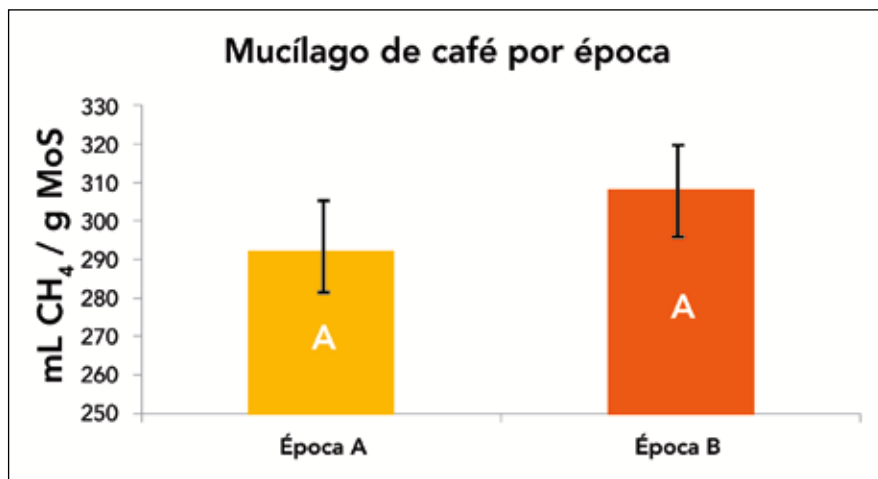


Figura 8. Rendimiento de metano del mucílago de café promedio comparando las dos épocas de cosecha.

res de diseño para un reactor anaerobio como tal, siendo recomendable el uso de sistemas continuos para la determinación de la producción de metano real y otros parámetros de diseño.

Según estas pruebas experimentales, no se determinó ningún efecto inhibitor del sustrato en la actividad metanogénica, que sirva como un indicador alentador para la implementación de reactores anaerobios, utilizando la pulpa y el mucílago de café, como fuente de energía renovable para su implementación en los mismos procesos de beneficiado.

En términos generales y considerando los valores promedios de rendimiento de metano, tanto de la pulpa como del mucílago de café de los tres beneficios, durante las

Potencial para Costa Rica

Del total del café beneficiado en el periodo 2012-2013 (ICAFÉ, 2013), se podría generar pulpa y mucílago para producir potencialmente 11 millones m³ de metano, que podrían ser convertidos en 33 GWhe, equivalentes al 73% de la energía generada, utilizando energía eólica en Costa Rica (IEA, 2011).

dos épocas; se estima que por cada fane-ga de café procesada, se genera pulpa y mucílago para la producción potencial de 4,89 m³ normales de metano.

Desde un punto de vista de estimación de la viabilidad energética de la industria del beneficiado del café, utilizando pulpa y/o mucílago, existe potencial para generar el

73% de la energía proveniente de sistemas eólicos.

Agradecimientos

Se agradece a las estudiantes de la Universidad EARTH, Lynda Medina y Bethy Jurado, por su participación activa en la investigación. De igual forma, a la Universidad EARTH por aportar los fondos necesarios para realizar esta investigación, a través de la Unidad de Biogás del Centro de Investigación y Desarrollo de Energías Renovables (CIDER), así como de la Unidad de Investigación.

Referencias:

Calzada, J.F.; León, O.R. de; Arriola, M.C. de; Micheo, F. de; Rolz, C.; León, R. de; Menchú, J.F. 1981. Biogas from coffee pulp. *Biotechnology Letters* 3(12):713-716.

Cenicafé. 2010. los subproductos del café: fuente de energía renovable. Disponible <http://biblioteca.cenicafe.org/bitstream/10778/351/1/avt0393.pdf>

Chacón, V.; Fernández, J.L. 1984. Capacidad de la pulpa de café para la producción de biogás. *Turrialba (IICA)* 34(2):143-146.

ICAFÉ (Instituto del Café de Costa Rica). 2013. Historia del café en Costa Rica. Disponible en: http://www.icafe.go.cr/nuestro_cafe/historia.html

IEA (International Energy Agency). 2011. Costa Rica: Electricity for 2011. Disponible en: <http://www.iea.org/statistics/statisticsearch/report/?country=COSTARICA&product=electricityandheat&year=2011>

Medina, Lynda y Jurado, Bethy. 2013. Estudio del rendimiento de metano de pulpa y mucílago de café. Tesis Ing. Guápiles, C.R, Universidad EARTH. Unidad de Biogás del Centro de Investigación y Desarrollo de Energías Renovables (CIDER).

Nallathambi Gunaseelan, V. 1997. Anaerobic digestion of biomass for methane production: a review. *Biomass and Bioenergy* 13(1):83-114.

Pandey, A.; Soccol, C. R.; Nigam, P.; Brand, D.; Mohan, R.; Roussos, S. 2000. Biotechnological potential of coffee pulp and coffee husk for bioprocesses. *Biochemical Engineering Journal* 6(2):153-162.

Stainer, R. 2011. Biogas production of coffee pulp and wastewater. *Renewable Energy efficiency promotion in International Cooperation. Confederacion Suiza*. Disponible en: http://www.ebp.ch/files/projekte/rk_kaffeeabfaelle_33_biogasproduction_steiner_ebp.pdf

Swiss Federal Office of Energy. s.f. Coffee pulp as a source of biogas. Suiza. Swiss Federal Office of Energy.

VDI (Verein Deutscher Ingenieure). 2006. Fermentation of organic materials: characterization of the substrates, sampling, collection of material data, fermentation tests. Germany (DE): VDI-Handbuch Energietechnik. 92 p.