

Determinación Teórica del BMP (Potencial Bioquímico de Metano) de los Lodos en una Planta de Tratamiento de Aguas Residuales de Victoria, Caldas.

Daniela Mora Cortés Asistencia de Investigación

Grupo de Investigación en Desarrollos Tecnológicos y Ambientales

GIDTA – 2018



Ingeniería Ambiental

Facultad de Ingeniería y Arquitectura

Universidad Católica de Manizales UCM®

Resumen

El presente trabajo enmarcado en la modalidad de asistencia de proyecto de investigación, permitió estudiar de manera teórica la determinación del potencial bioquímico de metano (BMP) de los lodos de una planta de tratamiento aguas residuales (PTAR) ubicada en el municipio de Victoria del departamento de Caldas, para su utilización en biodigestores con miras de producción de energía eléctrica; e indagar sobre la co-digestión con otros residuos agroindustriales encontrados en el medio para aumentar la eficiencia de la biodigestión. En el desarrollo del trabajo se realizaron campañas para sensibilizar a la comunidad en buenas

prácticas para mejorar la calidad del afluente de la planta de tratamiento de aguas residuales del mencionado municipio ya que la inadecuada disposición de vertimientos por parte de los usuarios del sistema de alcantarillado es uno de los principales inconvenientes que se logró evidenciar en la operación de la PTAR.

Palabras clave: *Potencial bioquímico de metano-PMB; Co-digestión; Biodigestión; Vertimientos.*

Justificación

La digestión anaerobia de lodos de una PTAR-D y co-digestión con sustratos (residuos agroindustriales) de la región, presentan una oportunidad para controlar los riesgos de contaminación que se pueden generar en el ambiente con los residuos propios del proceso. Por otro lado, el potencial energético de éstos y la posible aplicación en generación de electricidad es una alternativa que se puede implementar en el uso de plantas de tratamiento autosustentables.

Por ello surge la necesidad de obtener datos sobre el comportamiento de sistemas biológicos en la degradación de materia orgánica de procesos de co-digestión como son los ensayos de Potencial Bioquímico de Metano (PBM) en la PTAR del municipio de Victoria.

Objetivos

Objetivo General

Determinar teóricamente el Potencial Bioquímico de Metano de los lodos de la PTAR del municipio de Victoria, Caldas, para su implementación en biodigestores, y sensibilizar a la comunidad de mejorar la calidad del afluente de la PTAR.

Objetivos Específicos

- Revisar el estado del arte sobre el aprovechamiento de los lodos de una PTAR-D aerobia, y la co-digestión con diferentes sustratos agroindustriales.
- Obtener teóricamente el Potencial Bioquímico de Metano de los lodos, y el potencial teórico por co-digestión con un sustrato (residuo agroindustrial) de la región.
- Realizar campañas ambientales para sensibilizar a la comunidad de mejorar la calidad del afluente de la PTAR.

Metodología

Como el objetivo general del trabajo es determinar teóricamente el BMP de los lodos de una PTAR y su posibilidad de uso en la generación de electricidad a partir de la co-digestión con sustratos propios de la región, se planteó como estructura metodológica un desarrollo teórico experimental.

La metodología propuesta comenzó verificando la capacidad de generación de biogás de los lodos de las plantas de tratamiento de aguas residuales domésticas a partir de la revisión del estado del arte. También se verificó el reporte de uso de diferentes sustratos para la co-digestión en la generación de combustibles a partir de los lodos.

Luego de la revisión del estado del arte, se realizó trabajo de campo, donde se tomaron muestras de los lodos y de diferentes sustratos que serían tratados en laboratorio y luego se realizaría el análisis próximo y elemental en un laboratorio especializado en la ciudad de Cali. Con los datos obtenidos se procedería a los cálculos que permitirían obtener el BMP del lodo con co-digestión.

Durante las visitas de campo también se planteó realizar una campaña ambiental con las autoridades sociales del municipio, de tal forma que las personas tomaran conciencia de lo que se puede y lo que no se puede desechar en los desagües de los hogares para un buen funcionamiento de la PTAR. Marco teórico y revisión del estado del arte.

En este capítulo presentaremos los conceptos principales que se deben tener en cuenta al momento de determinar el Potencial Bioquímico de Metano de los lodos de una Planta de Tratamientos de aguas Residuales, a partir de éstos se realizará una revisión del estado del arte y por medio de esta poder analizar las técnicas más efectivas tanto en su producción de BMP y el mejor sustrato a utilizar para su co-digestión.

Para la revisión del estado del arte, se tuvo en cuenta que los artículos contarán principalmente con la prueba del potencial bioquímico de metano de lodos de aguas residuales domésticas en sistemas anaerobios y los diferentes tipos de sustratos de residuos agrícolas utilizados para co-digestión con este tipo de lodos. También se tuvo en cuenta parámetros tales como el tipo de reactor utilizado, variables de operación como pH, temperatura, Demanda química de oxígeno (DQO), Sólidos Volátiles (SV), Sólidos Totales (ST), alcalinidad (alk), y otros parámetros como relación inóculo:sustrato (ISR) y cinética. En la *Tabla 1* se presenta cada uno de los artículos seleccionados con sus respectivos parámetros.

Tabla 1- Revisión del estado del arte.

TÍTULO ARTÍCULO	TIPO DE REACTOR	VARIABLES DE OPERACIÓN	BMP (L CH ₄ / Kg SV)	SUSTRATO	CODIGESTIÓN	RELACIÓN INÓCULO/SUSTRATO	CINÉTICA (d ⁻¹)
(Da Silva, Astals, Peces, Campos, & Guerrero, 2018)	Vol:1600 mL y 240 mL, Tiempo de residencia: 15 días; etapas: 1	Temperatura: 37°C	3110000 mL CH ₄ / g SV	lodo de aguas residuales	glicerol	2 VS-base	0,39
(Aguilar, Wang, Roskilly, Pathare, & Lamidi, 2017)	tiempo de residencia: 20 días; etapas: 1	Temperatura: 35°C; ST: 5.4 g; SV: 84.53;	205000 mL CH ₄ /gSV	lodo de aguas residuales	residuos de alimentos	1 a 2	—
(Jianwei et al., 2017)	tiempo de residencia: 15 días; etapas: 1; Vol: 1000mL	DQO: 5240 mg / L; AGV: 183.9 mg COD / g; pH: 7,3; temperatura: 35°C	213400 mL / g	lodos de aguas residuales	Desechos viejos	1 a 9	—
(Zahedi, Rivero, Solera, & Perez, 2018)	Reactor: tipo humedo; Vol: 5000 mL c/u; Tiempo de residencia: 20 días	Temperatura: 35°C; pH: 7,5; ST:32,0 g ST / kg; SV: 18.0 g VS / kg; DQO: 4.05 g/L	800000 mL CH ₄ / gVS	lodo de aguas residuales	glicerol	1 a 1	—

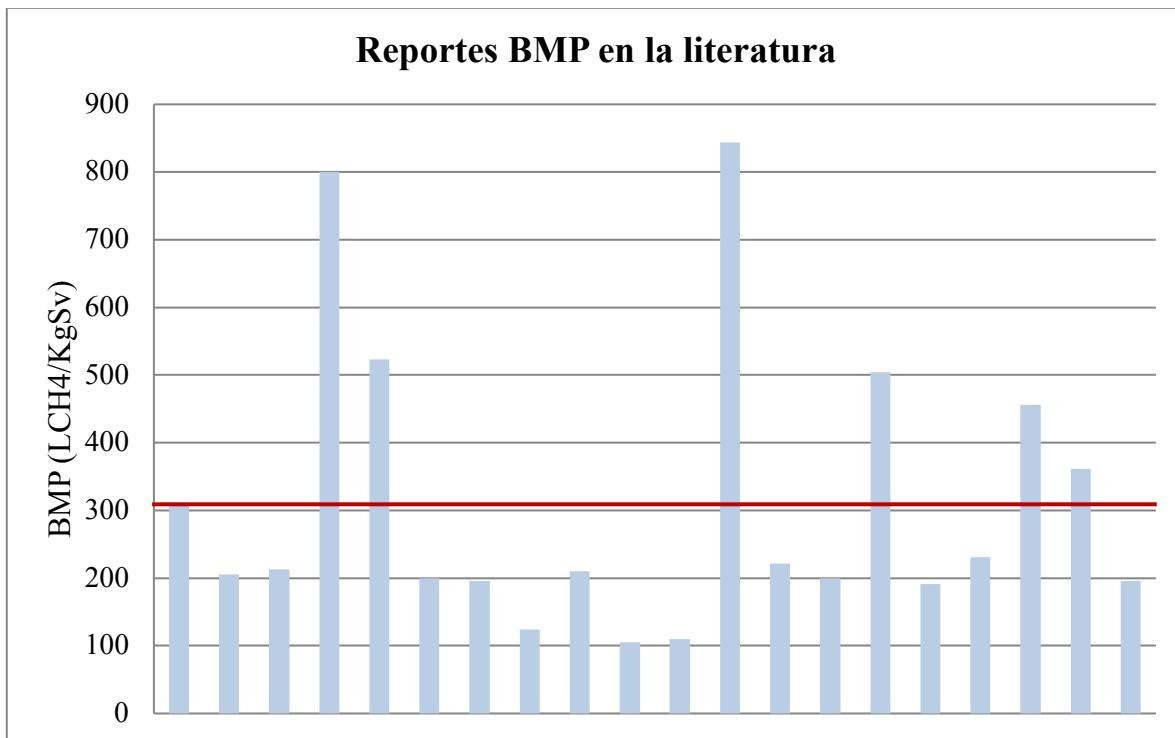
TÍTULO ARTÍCULO	TIPO DE REACTOR	VARIABLES DE OPERACIÓN	BMP (L CH ₄ / Kg SV)	SUSTRATO	CODIGESTIÓN	RELACIÓN INÓCULO/SUSTRATO	CINÉTICA (d ⁻¹)
(Nielfa, Cano, & Fdz-Polanco, 2018)	tiempo de residencia: 21 días; Vol: 10000 mL; etapas: 1	Temperatura: 35°C; C/N: 57-59;	523800 mLCH ₄ /LPOME	lodo de aguas residuales	racimos de fruta residuos de palma de aceite	0.12 -1; Chlorellasp.: 2	—
(Seo et al., 2017)	Tiempo de residencia: 19,5 días; vol: 1L	Temperatura: 30°C; pH: 4,2; SV: e 0,02 g/kg; DQO: 545 kg/L; DBO: 476 kg/L	200000mL COD/ g	lodos de aguas residuales	—	2 a 1	—
(Sunwane & Chairat, 2017)	Tiempo de residencia: 45 días; vol: 200 mL	DQO: 9,570-31,050 mg /L; pH: 5,9; alcalinidad: 2.500 mg/L	196000 mLCH ₄ /gSV	aguas residuales	estiercol de pollo	—	0.995
(Guo et al., 2018)	Tiempo de residencia: 17 días; Etapas: 2;	Temperatura:65°C; pH: 7,0; ST :13,6 g / L	124700 mL CH ₄ / g SV	lodos de aguas residuales	horujos de uva	—	—
(Thorin, Olsson, Schwede, & Nehrenheim, 2017)	tiempo de residencia: 20 días	Temperatura: 37°C; pH: 7,2	210000 mL CH ₄ / g VS	lodo de aguas residuales	microalgas	—	—
(Yongjun, Min, Aining, & Lui, 2017)	Vol: 2000mL; Tiempo de residencia: 14 días	pH: 6,5; Temperatura: 30°C; SV: 95.8 ± 6.6 g; OD: 3 a5 mg / L; TOC: 48,7%; MLSS: 40,8%	105600 mL CH ₄ / g VS	lodo de aguas residuales	—	1 a 1	—
(Aylin Alagöz, Yenigün, & Erdinçler, 2018)	vol: 1600 ml; tiempo de residencia: 30 días; etapas: 1	Temperatura: 37°C; pH: 7,3; alcalinidad: 2300-3450 mg CaCO ₃ / L	110000 mL CH ₄ /gVS	lodo de aguas residuales	aceitunas y orujos de uva	1 a 1	—
(Passos, Cordeiro, Baeta, de Aquino, & Perez-Elvira, 2018)	tiempo de residencia: 15 días; Vol: 5000L; etapas: 2; tipo de reactor: humedo	Temperatura: 120°C; TS: 894,3 g/kg; VS: 700,6 g/kg; TOC: 725,7 g/kg; pH: 7,5	196000 mLCH ₄ / gVS	lodos de aguas residuales	casaca de café	0,5 g VS / g VS	0,38

TÍTULO ARTÍCULO	TIPO DE REACTOR	VARIABLES DE OPERACIÓN	BMP (L CH/ Kg SV)	SUSTRATO	CODIGESTIÓN	RELACIÓN INÓCULO/SUSTRATO	CINÉTICA (d ⁻¹)
(Amen, Eljamal, Khalil, & Matsunaga, 2017)	Tiempo de residencia: 14 días; Vol: 5000mL	Temperatura: 37°C ; pH: 6,2; alcalinidad: , 0,374 (mg CaCO3 / L; DQO: , 494 mg/L	844000 mL CH4/ g	lodo de aguas residuales	zeolita	2 a 1	0,039
(Nielfa, Cano, & Fdz-Polanco, 2015)	Tiempo de residencia: 39 días; Vol: 2000mL;	Temperatura: 35°C;Ph:7,8; ST:229 g/kg; SV: 192 g/kg;	22100 mLCH 4 / gVS	lodos de aguas residuales	residuos solidos	1 a 1	0,4
(Panomchai, Umapom, & Kulyakorn, 2016)	tiempo de residencia: 48 días; reactor tipo humedo; etapas: 1; vol: 5000mL	Temperatura: 37°C; ST: 658,000 mg/kg y 162,983 mg/kg; SV: 422,000 mg/kg y 143,250 mg/kg; Humedad: 18.49% y 81.10%	200000 mL biogás/ g SV	lodos de aguas residuales	Estiércol de gallina y Hierba de napier	1 a 1	_____
(Sopee & Natthanicha, 2017)	tiempo de residencia: 30 días;tipo de reactor: humedo; etapas: 1	Temperatura: 37°C;pH:4,1, 10,3 y 10,3; humedad: 38,69%, 60,29 % y 81,30%; ; SV: 604,03 mg/g, 306,74 mg/g y 119,91 mg/g; ST: 613,08 mg/g, 397,10 mg/g y 187,01 mg/g	504800 mL CH4 / gVS	lodos de aguas residuales	Hoja de maíz	1 a 1	_____
(Saowaluck, Ubonrat, Siriorn, & Nipon, 2014)	tiempo de residencia: 20 días;vol: 5000mL; etapas: 1	pH: 7,5; temperatura: 37°C; ST: 7,91 g/kg; DQO: 332 mL g - 1	191000mLCH4/ g SV	lodos de aguas residuales	casaca de plátano y glicerol	_____	0,97
(Maamri & Amrani, 2014)	tiempo de residencia: 15 días; vol: 5000mL; tipo e reactor: humedo	temperatura: 55°C; ST: 35, 8 g/ L; pH: 7,8; SV: 0.213 g/L	231000 mL biogás/ g SV	lodos de aguas residuales	estiércol de bovino	1 a 1	0,996
(Wantanasak, Kanathip, Jiravut, & Sompong, 2017)	tiempo de residencia: 45 días; vol: 5000mL; etapas: 1	temperatura: 35°C; pH:5,6; DQO: 4,4 g/L	456000 mL CH 4/ g SV	lodos de aguas residuales	desechos de aceite de palma	99 a 1	_____
(Jagadish, MAL, Shankar, Kumar	tiempo de residencia: 60 días; vol: 2000mL	temperatura: 37°C; pH: 6,7	361000 mL biogás / g SV	lodos de aguas residuales	jacintos de agua y desechos de ovejas	_____	_____

TÍTULO ARTÍCULO	TIPO DE REACTOR	VARIABLES DE OPERACIÓN	BMP (L CH ₄ / Kg SV)	SUSTRATO	CODIGESTIÓN	RELACIÓN INÓCULO/SUSTRATO	CINÉTICA (d ⁻¹)
Mahesh, & BP Pradeep, 2014)							

Nomenclatura: DBO =Demanda biológica de oxígeno; DQO = Demanda química de oxígeno.

Ilustración 1. Promedio reportes BMP en la literatura



Al agrupar los datos de el BMP obtenido por cada uno de los autores encontramos una medida de estos de un promedio de 310 LCH₄/KgSV.

De la anterior revisión se resaltan los siguientes autores teniendo en cuenta la efectividad en la producción de metano y el tipo de sustrato utilizado al realizar la co-digestión con los lodos:

(Zahedi, Rivero, Solera, & Perez, 2018) plantea que “se tiene por objetivo principal examinar el efecto del aumento de las tasas de carga orgánica (OLRs), reduciendo el tiempo de retención de sólidos (SRT) de 20 d a 5 d, en la co-digestión anaeróbica mesofílica monofásica de lodos de depuradora con glicerina (1% v/v).”Y desarrolla experimentalmente que la co-digestión

anaeróbica de éstos en condiciones estables pueden lograr una reducción del $85 \pm 5\%$ de los ácidos grasos volátiles (AGV) en el SRT de entre 20 y 9 d, con un rendimiento de producción de metano de alrededor de 800 L de CH₄/l/día.

En (Zahedi, Rivero, Solera, & Perez, 2018) se resalta que “la Digestión Anaerobia de lodos de la depuradora y glicerina a un SRT inferior a 20 días es posible y preferible debido a que es más económico y respetuoso con el medio ambiente. Las disminuciones en el SRT no sólo permiten la producción de biogás, sino que también provocan un aumento de los residuos que podrían tratarse y una reducción de los costes iniciales (menor volumen del reactor) y de los costes de explotación (menor volumen/tiempo de calentamiento y mezcla) en un proceso de la vida real. Este es un hecho importante, ya que la gestión de los lodos es un problema grave. Hasta la mitad de los costes de funcionamiento de las plantas de tratamiento de aguas residuales están asociados con el tratamiento y la eliminación de lodos, se estima que el mercado del biodiesel producirá anualmente 4.000 millones de galones de glicerina cruda. Por lo tanto, cualquier proceso que permite tratar más residuos en menos tiempo que conduce a una reducción de los costes de las EDAR.”

(Zahedi, Rivero, Solera, & Perez, 2018) concluye que la co-digestión de la glicerina y el lodo es totalmente estable en un SRT entre 9 y 20 días y no hay diferencias significativas en la generación de metano o de materia orgánica en estas condiciones, además que el proceso es más económico y amigable con el medio ambiente.

En (Amen, Eljamal, Khalil, & Matsunaga, 2017) se probaron seis biorreactores con diferentes aditivos de nano-escala de hierro cero valente (nZVI), zeolita, nZVI y mezcla de zeolita (IMZ), y partículas de zeolita recubiertas de nZVI (ICZ) para evaluar el rendimiento global de la digestión anaeróbica de los lodos domésticos a menos de 37 °C. Durante 14 días se midieron la producción diaria de biogás, el contenido de metano, el pH, la demanda química de oxígeno soluble (DQO soluble), la alcalinidad total y las variaciones del nitrógeno amoniacal total, y se evaluó el rendimiento global de la digestión anaeróbica. Los resultados mostraron que la adición de ICZ causó un período de retardo antes de comenzar a generar un volumen significativo de biogás, entonces la producción acumulada aumentó más que la de

los otros birreactores, y cuanto más altas eran las partículas de hierro recubiertas de zeolita, más se generaba el biogás. En comparación con el birreactor de control, los dos contenidos más altos de metano se representaron con la adición de la única mezcla de nZVI y IMZ y el contenido de metano se estimuló hasta el 88 y 74%, respectivamente. Sin embargo, el volumen máximo acumulativo de metano se obtuvo con el suplemento de ICZ con una carga de 1000 mg/L de nano-partículas de hierro.

(Amen, Eljamal, Khalil, & Matsunaga, 2017) dice que “estos resultados pueden atribuirse a la alta reactividad de las nano-partículas, que puede atribuirse a la corrosión anaeróbica del nZVI y a la generación de electrones que podrían utilizarse eficazmente en la utilización de metanógenos y la producción de metano. Considerando su alta eficiencia y buen rendimiento, el sistema de zeolita de hierro puede extenderse a aplicaciones prácticas de ingeniería para la producción de biometano.”

Como conclusión (Amen, Eljamal, Khalil, & Matsunaga, 2017) tiene que la adición de ICZ provoca un período de retardo antes de empezar a producir una cogeneración de biogás significativa que alcanza un valor máximo en comparación con los otros biorreactores, y cuanto más altas son las partículas de hierro recubiertas de zeolita, más se genera el biogás. Los resultados preferibles de la producción acumulativa de metano se obtuvieron al complementar las partículas ICZ 1000, lo que dio el volumen máximo de producción de metano.

(Sopee & Natthanicha, 2017) dice que “las áreas sembradas de maíz dulce en Tailandia se estiman en más de 2.8 millones de hectáreas y también es probable que aumenten en un promedio de alrededor de 0.9% cada año. Estos llevan a aumentar las cantidades de residuos de maíz dulce como árboles, hojas, mazorcas y cáscaras, que se acumulan en los campos para su manejo de quema a más de 35.000 toneladas por año. Se utilizaron residuos de maíz como materiales para la digestión anaeróbica seca mediante co-digestión que son comúnmente consideradas en la literatura como una de las soluciones más efectivas para reducir las emisiones de gases de efecto invernadero en el sector de la construcción. El objetivo principal de este trabajo es evaluar la viabilidad de la utilización de la función de demanda de calor - temperatura exterior para la demanda de calor pronóstico.”

En (Sopee & Natthanicha, 2017) concluye que se establecieron las utilidades de residuos de maíz dulce y de excrementos de animales en la co-digestión anaeróbica seca. Los residuos de maíz dulce que eran materiales lignocelulósicos fueron pre tratados con 2% (p/v) de solución de NaOH en un tiempo de 4 a 8 horas para la recuperación de la lignocelulosa para producir una alta cantidad de azúcares. Además, las co-digestiones en seco se lograron en una proporción de 1:1 de desechos de maíz y excrementos. La temperatura de digestión era controlada a 37 °C y otras condiciones, diferentes a la co-digestión anaeróbica seca, también fueron controladas. La co-digestión seca con estiércol de cabra con hojas de maíz fue la mejor condición que produjo el 46,13% de metano, 504.8 L/gVS de producción de metano y 74.37% de eliminación de DQO. En estos sistemas de biogás seco no se mostró el alto potencial de degradación de los residuos de maíz, pero también se mostraron otras formas de eliminar los residuos agrícolas del ambiente y también se produjo energía verde renovable.

Selección de sustrato para la co-digestión.

Teniendo en cuenta que se trabajará con un residuo de la región para ser utilizado como sustrato, se escoge las capotas de cacao siendo esta una de las mejores opciones para ser utilizada en la co-digestión con los lodos residuales de la PTAR de Victoria. Según la revisión bibliográfica se encuentra que “la capota de cacao representa el mayor subproducto de la industria chocolatera tanto en Colombia como a nivel mundial. Actualmente han aumentado estudios relacionados para este tipo de residuos y su posible utilización, debido a que estos representan un importante componente de los residuos agrícolas y desechos agroindustriales en el mundo, constituyendo una buena fuente de recursos renovables y energía.”(Aveni, 2010) Colombia es el tercer país productor de cacao en América Latina, luego de Brasil y Ecuador. DANE (2014) afirma:

(DANE, 2014)

En 2006 las exportaciones de la cadena cacao-chocolatería sumaron más de 56 millones de dólares. En Colombia ocupa un lugar importante entre los productos agrícolas más comerciales para el país, con un área cosechada de 164.332 hectáreas o 2.8% del total agrícola. Las producciones cacaoteras en el país se han caracterizado por su bajo nivel tecnológico, en donde sólo se realiza el control de malezas, poda y

recolección de la cosecha. El cacao se produce en casi todos los departamentos del país, pero se concentra principalmente en Santander, Nariño, Arauca y Antioquia. Caldas ocupa el octavo lugar en producción con un 4.1% de la producción nacional de cacao. (p.231)

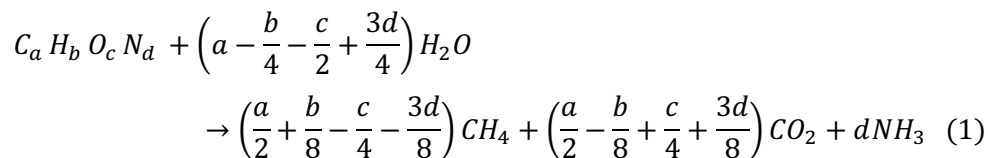
Digestión anaerobia.

La digestión anaerobia se define como el proceso en el cual los microorganismos descomponen material biodegradable en ausencia de oxígeno, encargándose de estabilizar la materia orgánica convirtiéndolos en humus y gases como el dióxido de carbono y el metano, siendo estos los más abundantes. Sánchez (2016) nos dice:

(Sánchez et al., 2016)

El principal beneficio de la digestión anaeróbica es el gas metano producido, que puede aprovecharse para la producción de energía eléctrica. Una de las técnicas más manejadas para esta finalidad es realizar co-digestión entre residuos orgánicos (ya sean de alimentos o animales) y los lodos primarios generados en las PTARs para convertirlos en metano (CH₄). La prueba del potencial bioquímico de metano (PBM) es un método analítico muy utilizado en este tipo de técnicas, pues sirve para evaluar de forma rápida si un residuo puede ser correctamente degradado y así producir CH₄. El valor experimental está dado como mL CH₄/g SV adicionados al reactor. La biodegradabilidad de un sustrato está indicada por el rendimiento de CH₄, es decir, por el porcentaje de sólidos que se adicionan o destruyen durante la DA. (p.2)

Una de las expresiones empleadas para la determinación del BMP es la ecuación de Buswell, la cual se fundamenta en la composición del sustrato y representa una reacción redox balanceada en la cual los productos de la digestión anaerobia son metano, dióxido de carbono y amoníaco.



Donde *a*, *b*, *c* y *d* son los coeficientes estequiométricos de las moléculas biodegradables. Recuperado de Chen & Liew, 2003. Ecuación 11.21.

Desarrollo experimental

En este capítulo se aplicará la ecuación de Buswell para determinar de manera teórica el Potencial Bioquímico de Metano de los lodos residuales de la Planta de Tratamientos de Aguas Residuales del municipio de Victoria, Caldas, para así obtener la relación sustrato - cosustrato de manera teórica y luego proceder a su aplicación experimental.

Para la determinación del BMP Teórico se tuvo en cuenta los resultados obtenidos del análisis próximo y elemental realizado a las muestras de los lodos residuales de la PTAR y de los sustratos a utilizar para la co-digestión efectuados en el laboratorio de combustión de la Universidad del Valle (ver Anexo 1 y Anexo 2), en este caso es el residuo de cacao; a partir de estos se realizó un balance estequiométrico de las moles de CH₄ a partir de 100 g de sustrato (residuo capota de cacao).

En este sentido, se trabajó con los resultados del análisis elemental, de donde se abstraigo los resultados de las muestras totalmente secas como se evidencia en la *Tabla 2*:

Tabla 2- Resultados del análisis elemental de las muestras de los sustratos sin humedad.

ANÁLISIS ELEMENTAL		
Elemento químico	Lodos %	Capota de cacao %
C	32.34	45.4
H	4.88	5.33
O	20.30	37.81
N	5.84	1.31
Ceniza	35.81	9.86

Posteriormente, se tomaron estos resultados y se dividieron sobre su respectiva masa atómica para hallar las moles utilizando la siguiente ecuación:

$$n = \frac{\text{masa del elemento (g)}}{\text{masa atómica del elemento}} = \text{moles}$$

Lodos:

$$C = \frac{32.34}{12.0107} = 2.69$$

$$H = \frac{4.88}{1.00794} = 4.88$$

$$O = \frac{20.30}{15.9994} = 1.27$$

$$N = \frac{5.84}{14.0067} = 0.42$$

Capota de cacao:

$$C = \frac{45.4}{12.0107} = 3.78$$

$$H = \frac{5.33}{1.00794} = 5.33$$

$$O = \frac{37.81}{15.9994} = 2.36$$

$$N = \frac{1.31}{14.0067} = 0.09$$

Por último, se halló la relación molar entre el Carbono y el Nitrógeno, a partir de la *Ecuación 2*, la relación molar tiene como fin convertir en una reacción química, la cantidad de moles de una sustancia a la cantidad correspondiente de moles de otra sustancia.

$$\text{Relación} = \frac{\text{mol elemento}}{\text{mol de Nitrógeno}} = \text{relación n: N (2)}$$

Lodos:

$$C = \frac{2.69}{0.41} = 6.56$$

$$H = \frac{4.88}{0.41} = 11.9$$

$$O = \frac{1.26}{0.41} = 3.00$$

$$N = \frac{0.41}{0.41} = 1$$

Relación C: N = 6.56: 1

Capota de cacao:

$$C = \frac{3.77}{0.09} = 41.8$$

$$H = \frac{5.33}{0.09} = 59.2$$

$$O = \frac{2.36}{0.09} = 14.5$$

$$N = \frac{0.09}{0.09} = 1$$

Relación C: N = 41.8: 1

A continuación se presenta la *Tablas 3 y Tabla 4* con los resultados correspondientes a cada sustrato:

Tabla 3- Cálculo peso molecular de los lodos.

símbolo químico	masa %	masa (g)	mol	r.Molar
C	32.34	32.34	2.69	6.56
H	4.88	4.88	4.88	11.9
O	20.30	20.30	1.26	3
N	5.84	5.84	0.41	1
Ash	35.81	35.81	---	---

Basándonos en la relación molar la formula química obtenida es $C_{6.56}H_{11.9}O_3N$.

Tabla 4- Cálculo peso molecular de la capota de cacao.

símbolo químico	masa %	masa (g)	mol	r.Molar
------------------------	---------------	-----------------	------------	----------------

C	45.4	45.4	3.77	41.8
H	5.33	5.33	5.33	59.2
O	37.81	37.81	2.36	14.5
N	1.31	1.31	0.09	1
Ceniza	9.86	9.86	---	---

La fórmula química obtenida es $C_{41.8}H_{59.2}O_{14.5}N$.

La determinación del BMP se realizó a través del programa de Excel como se muestra en la *Tabla 5*, cuyo objetivo fue determinar las relaciones másicas por un balance de materia y así hallar la masa total de la suma de los dos sustratos que cumpla la relación C: N de 20-25:1 y la respectiva relación másica de cada uno, teniendo en cuenta un peso molecular de 1000 $g \cdot mol^{-1}$ de capota de cacao (c.cacao) y 842 $g \cdot mol^{-1}$ de lodos residuales.

Tabla 5- Determinación de la masa total utilizando 1000 g de c.cacao y 842 de lodos residuales.

Símbolo químico	% c.cacao	% lodos	masa c.cacao	masa lodos	masa total	% total
C	45,28	31,62	452,8	266,2404	719,0404	39,035852
H	5,73	4,29	57,3	36,1218	93,4218	5,071759
O	41,79	19,33	417,9	162,7586	580,6586	31,523268
N	1,23	2,52	12,3	21,2184	33,5184	1,8196743
cenizas	5,97	42,24	59,7	355,6608	415,3608	22,549446
				total	1842	100

Basándonos en los cálculos anteriores se encontró que la mejor manera de tener una eficiencia en la codigestión es 86.44% de capota decacao y 13.56% de lodos residuales.

Teniendo en cuenta la masa total de ambos sustratos, en la *Tabla 6* se presenta el cálculo de la fórmula química de la mezcla sustrato - cosustrato y el cálculo de su respectivo peso molecular y posteriormente hallar la relación molar para la estimación estequiometría en la ecuación de Buswell:

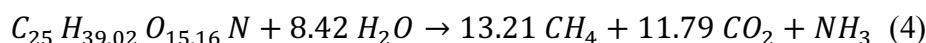
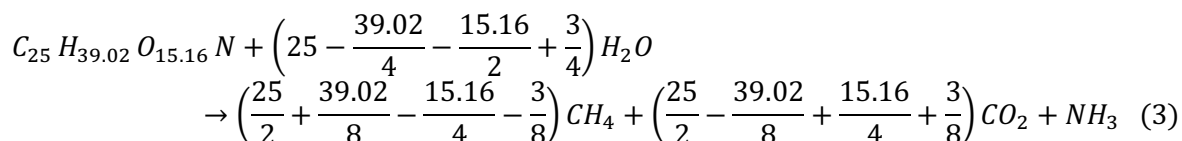
Tabla 6- Cálculo del peso molecular y relación molar.

Símbolo químico	%	Masa (g)	moles	r. Molar
C	39,035852	39,035852	3,2500	25,005
H	5,071759	5,071759	5,0718	39,021

O	31,523268	31,523268	1,9702	15,158
N	1,8196743	1,8196743	0,1300	1

La fórmula química obtenida es $C_{25}H_{39.02}O_{15.16}N$.

Una vez obtenidos los respectivos valores en la relación molar, se reemplazan en la ecuación de Buswell como se muestra a continuación:



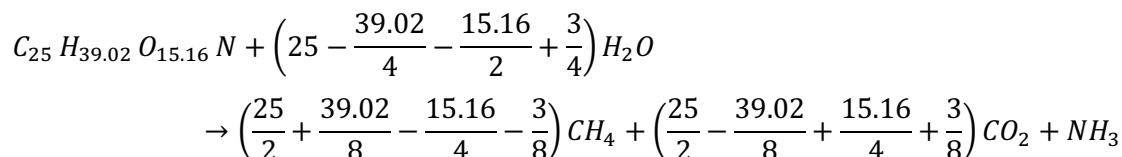
De acuerdo a la ecuación anterior se observa que con una relación molar (r.Molar) de Carbono: 25; Hidrógeno: 39.02; Oxígeno: 15.16 y Nitrógeno: 1; hay una producción molar de Metano, Dióxido de carbono y Amoniacó con valores de 13.215302 mol, 11.789239 mol y 1 mol, respectivamente por cada mol de mezcla sustrato-cosustrato.

Tabla 7 – Cálculo de sólidos volátiles después del balance de masas.

Cálculos sólidos volátiles (SV)						
masa lodos	842	g	% SV	57,65	48541	g SV
masa c. cacao	1000	g	% SV	68,82	68820	g SV
masa total	1842	g	-----		117361	g SV

MSC: mezcla sustrato-cosustrato.

De una masa 1842 g de MSC CONTIENE 1173.61 g en sólidos volátiles (SV). Para 1000 g de MSC que suponemos desde el principio hay 637.138 g de sólidos volátiles.



$$PM_{MSC} = 595.85 \text{ g/mol}$$

Se supone 1000 g de MSC

$$M_{MSC} = 1000\text{g}$$

$$M_{SV} = 637.138 \text{ g}$$

Se obtienen las moles con el peso molecular:

$$mol = \frac{masa}{peso\ molecular} \quad (5)$$

$$mol = \frac{637.138 \text{ gSV}}{595.85 \text{ g/mol}} = 1.07 \text{ mol SV}$$

Se realiza la estequiometria para calcular cuantas moles de CH_4 se obtienen por 1000 g de MSC y su equivalente en sólidos volátiles 637.138 g SV.

$$1.07 \text{ mol SV} = \frac{13.21 \text{ mol } CH_4}{1 \text{ mol SV}} = 14.37 \text{ mol } CH_4$$

Una vez obtenida la cantidad molar de CH_4 se evaluó el $PBM_{Teórico}$ con la expresión:

$$BMP_{Teórico} = \frac{LCH_4}{KgSustrato} \quad (6)$$

Para saber el volumen en L del metano es necesario hacer un despeje de la ecuación de gases ideales:

$$PV = nRT \quad (7)$$

Donde:

T: temperatura promedio de Victoria= $26^\circ\text{C} = 26^\circ\text{C} + 273.15 = 299,15 \text{ K}$

P: presión atmosférica de Victoria - Caldas=0.9958 atm

R: constante = 0.082 L/atm/mol*K

n: número de moles= 14.37

V:?

$$V = \frac{14.37 \text{ mol} \left(0.082 \frac{\text{L}}{\text{mol} \cdot \text{K}} \right) 299.15 \text{ K}}{0.9958 \text{ atm}} = 353.98 \text{ L}$$

$$BMP = \frac{LCH_4}{KgS}$$

$$BMP_{\text{Teórico}} = \frac{353.98 \text{ L CH}_4}{0.637 \text{ KgSV}} = 555.7 \frac{\text{LCH}_4}{\text{KgSV}}$$

De los resultados obtenidos del $BMP_{\text{Teórico}}$ se observa que hay producción de CH_4 a niveles similares a los encontrados en la literatura, lo que indica que hay mucho potencial de generación de biogás al realizar la co-digestión con el capacho del cacao. Valores muy similares a los encontrados en la revisión del estado del arte que presenta un promedio de $310 \text{ LCH}_4/\text{KgSV}$, con ello se comprueba que en esta investigación se obtuvieron resultados prometedores y que el paso siguiente es obtener valores de la evaluación de BMP para diferentes relaciones de Sustrato: Inoculo.

Desarrollo de campañas ambientales.

En este capítulo se hace énfasis en la gestión para la realización de las campañas ambientales con el fin de concienciar a la comunidad de Victoria, Caldas de buenas prácticas al momento de verter las aguas.

Se tuvo una reunión en la alcaldía de Victoria con el Secretario de Gobierno, el cual autorizó realizar dichas campañas y así mismo sugirió algunas visitas al delegado de las comunidades, a los centros educativos del municipio, entre otros.

Al realizar la reunión con el delegado de las comunidades del municipio y sus respectivos líderes, se plantearon diferentes actividades para la realización de las campañas como la socialización a la comunidad de nuestra investigación y las recomendaciones para el uso del

recurso hídrico al momento de consumir y verter aguas, a través de un boletín con tips para el cuidado del agua (Ver Anexo 3) y una cuña radial que se hizo en colaboración del Programa de Publicidad de la Universidad Católica de Manizales, por medio del programa radial “Sabias que...”, la cual fue publicada a través de la página web de la UCM a través del siguiente link: <http://www.ucm.edu.co/radio/sabias-que/>; y permitió que dicha información llegara al municipio, sus zonas aledañas, centros educativos y comunidad en general.

Conclusiones, recomendaciones y trabajo futuro

Conclusiones generales

Al determinar el potencial bioquímico de metano de manera teórica, se obtuvo un resultado que muestra que el tipo de sustrato utilizado para la co-digestión en producen 353.98L de metano por kilogramo de SV, siendo este un valor aceptable para su utilización en biodigestores, aprovechando el potencial energético de éstos y la posible aplicación en generación de electricidad siendo una alternativa que se puede implementar en el uso de plantas de tratamiento autosustentables.

- ✓ La monodigestión de cada sustrato por aparte no es tan eficiente como la codigestión de ambos sustratos, pues se evidencia que en la relación molar C:N de los lodos es de 6.56:1, en la de la capota de cacao es de 41.8:1, mientras que en la codigestión de ambos sustratos es de 25:1.

- ✓ En nuestro país y en nuestra región apenas se están dando los pasos para tener una cultura por el cuidado del ambiente, sin embargo con las campañas de sensibilización realizadas en articulación con la secretaria del municipio de Victoria y el representante de los líderes sociales, se desarrolló un gran trabajo para crear conciencia a través de la cuña radial y el boletín de las acciones que se deben tener en cuenta sobre la importancia y cuidado del recurso hídrico, los

cuales fueron dirigidos a estudiantes de centros educativos del municipio y a la comunidad en general.

Recomendaciones

Con base a esta investigación se recomienda a la Planta de tratamientos de aguas residuales del municipio de Victoria la implementación de tecnologías de digestión anaerobia ya que presenta múltiples beneficios en cuanto al auto sustentación de la misma, generando la electricidad a través de la producción de biogás dando un buen aprovechamiento a los residuos orgánicos que se producen en la región para el propio funcionamiento de la PTAR y de esta manera crear una optimización en sus recursos.

En ese sentido también se recomienda a la Universidad Católica de Manizales, a sus estudiantes e investigadores la implementación de este tipo de tecnologías, pues tiene mucho que ofrecer en el campo de la investigación, ya que la producción de biogás es una gran alternativa para reducir las emisiones de gases de efecto invernadero, y también es una alternativa de combustible que se utiliza para la generación de electricidad y calor.

Bibliografía


- Aguilar, M. C., Wang, Y. D., Roskilly, T., Pathare, P. B., & Lamidi, R. O. (2017). Biogas from anaerobic co-digestion of food waste and primary sludge for cogeneration of power and heat. *Energy Procedia*, 142, 70–76. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.12.012>
- Amen, T. W. M., Eljamal, O., Khalil, A. M. E., & Matsunaga, N. (2017). Biochemical methane potential enhancement of domestic sludge digestion by adding pristine iron nanoparticles and iron nanoparticles coated zeolite compositions. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 5(5), 5002–5013. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2017.09.030>
- Ayeni, L. . (2010). Effect of Combined Cocoa Pod Ash and NPK Fertilizer on Soil Properties , Nutrient Uptake and Yield of Maize (*Zea mays*), 6(3), 79–84.
- Aylin Alagöz, B., Yenigün, O., & Erdinçler, A. (2018). Ultrasound assisted biogas production from co-digestion of wastewater sludges and agricultural wastes: Comparison with microwave pre-treatment. *Ultrasonics Sonochemistry*, 40(December 2016), 193–200. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2017.05.014>

- Da Silva, C., Astals, S., Peces, M., Campos, J. L., & Guerrero, L. (2018). Biochemical methane potential (BMP) tests: Reducing test time by early parameter estimation. *Waste Management*, *71*, 19–24. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2017.10.009>
- DANE. Censo Nacional Agropecuario. (2014).
- Guo, L., Zhang, Z., Gao, M., She, Z., Zhao, Y., Guo, Y., & Sun, J. (2018). Comparison of thermophilic bacteria and alkyl polyglucose pretreatment on two-stage anaerobic digestion with waste sludge: Biogas production potential and substrate metabolism process. *Bioresource Technology*, *249*, 694–703. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2017.10.067>
- Jagadish, H. P., MAL, A., Shankar, B., Kumar Mahesh, S., & BP Pradeep, K. (2014). Anaerobic Co-Digestion of Water Hyacinth and Sheep Waste. *Energy Procedia*, *52*, 572–578. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2014.07.112>
- Jianwei, Z., Lin, G., Qilin, W., Yiwen, L., Dongbo, W., Bing-Jie, N., ... QI, Y. (2017). Aged refuse enhances anaerobic digestion of waste activated sludge. *Water Research*, *123*, 724–733. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2017.07.026>
- Maamri, S., & Amrani, M. (2014). Biogas production from waste activated sludge using cattle dung inoculums: Effect of total solid contents and kinetics study. *Energy Procedia*, *50*, 352–359. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2014.06.042>
- Nielfa, A., Cano, R., & Fdz-Polanco, M. (2015). Theoretical methane production generated by the co-digestion of organic fraction municipal solid waste and biological sludge. *Biotechnology Reports*, *5*(1), 14–21. <https://doi.org/10.1016/j.btre.2014.10.005>
- Nielfa, A., Cano, R., & Fdz-Polanco, M. (2018). Theoretical methane production generated by the co-digestion of organic fraction municipal solid waste and biological sludge. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *82*(August 2017), 2993–3006. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.10.036>
- Panomchai, W., Umaporn, K., & Kulyakorn, K. (2016). Optimum Ratio of Chicken Manure and Napier Grass in Single Stage Anaerobic Co-digestion. *Energy Procedia*, *100*(September), 22–25. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2016.10.141>
- Passos, F., Cordeiro, P. H. M., Baeta, B. E. L., de Aquino, S. F., & Perez-Elvira, S. I. (2018). Anaerobic co-digestion of coffee husks and microalgal biomass after thermal hydrolysis. *Bioresource Technology*, *253*(December 2017), 49–54. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2017.12.071>
- Sánchez, C., Patiño, M., Alcántara, J. L., Reyes, Y., Pérez, M. A., & Ortíz, E. (2016). Determinación del Potencial Bioquímico de Metano de residuos de frutas y verduras en hogares, *32*(2), 191–198. <https://doi.org/10.20937/RICA.2016.32.02.05>
- Saowaluck, H., Ubonrat, S., Siriorn, B., & Nipon, P. (2014). Biomethane Production from Co-digestion of Banana Peel and Waste Glycerol. *Energy Procedia*, *61*, 2219–2223. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2014.12.113>
- Seo, K. W., Choi, Y. S., Gu, M. B., Kwon, E. E., Tsang, Y. F., Rinklebe, J., & Park, C. (2017). Pilot-scale investigation of sludge reduction in aerobic digestion system with endospore-forming bacteria. *Chemosphere*, *186*, 202–208. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2017.07.150>
- Sopee, P., & Natthanicha, S. (2017). Methane production potential from anaerobic co-digestions of different animal dungs and sweet corn residuals. *Energy Procedia*, *138*, 943–948. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.10.062>
- Sunwanee, J., & Chairat, S. (2017). Kinetic Model of Biogas Production from Co-digestion of Thai Rice Noodle Wastewater (Khanomjeen) with Chicken Manure. *Energy*

- Procedia*, 138, 386–392. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.10.177>
- Thorin, E., Olsson, J., Schwede, S., & Nehrenheim, E. (2017). Biogas from Co-digestion of Sewage Sludge and Microalgae. *Energy Procedia*, 105, 1037–1042. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.03.449>
- Wantanasak, S., Kanathip, P., Jiravut, S., & Sompong, O.-T. (2017). Anaerobic Co-Digestion of Palm Oil Mill Waste Residues with Sewage Sludge of for Biogas Production. *Energy Procedia*, 138, 789–794. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.10.068>
- Yongjun, L., Min, G., Aining, Z., & Lui, Z. (2017). Strengthen effects of dominant strains on aerobic digestion and. *Bioresource Technology*, 235, 202–210. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2017.03.060>
- Zahedi, S., Rivero, M., Solera, R., & Perez, M. (2018). Ultrasound assisted biogas production from co-digestion of wastewater sludges and agricultural wastes: Comparison with microwave pre-treatment. *Fuel*, 215(March 2017), 285–289. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2017.11.007>

Anexos

Anexo 1. Resultados del Análisis próximo y elemental de los lodos.

		FACULTAD DE INGENIERÍA Escuela de Ingeniería de Recursos Naturales y Medio Ambiente Laboratorio de Combustión Combustible		ENTREGA DE RESULTADOS ANÁLISIS PRÓXIMO Y ELEMENTAL	
Informe N°:	234-18	Cliente:	UNIVERSIDAD CATÓLICA DE MANIZALES		
Fecha recepción (a-m-d):	2018-10-23	Dirección cliente:	Carrera 23 # 80-83 Av Santander Manizales - Caldas		
Fecha inicio de análisis (a-m-d):	2018-10-23	Cód. identificación del cliente:	LODOS		
Fecha final de análisis (a-m-d):	2018-11-02	Cód. identificación del laboratorio:	SV092-01		
Fecha elaboración inf. (a-m-d):	2018-11-02				
Tipo de muestra:	Sólida				

Próximo			
Análisis	Método	Cómo se recibe	Seco
Humedad Total (% en peso)	ASTM D 3302	1,83	
Materia Volátil (% en peso)	ASTM D 3175	56,59	57,65
Cenizas (% en peso)	ASTM D 3174	35,15	35,81
Carbon Fijo (% en peso)	ASTM D 3172	6,42	6,54
Poder Calorífico Superior (kcal/kg)	ASTM D 5865	3417,9	3481,7
Poder Calorífico Superior (BTU/lb)	ASTM D 5865	6152	6267
Azufre (% en peso)	ASTM D 4239	0,81	0,83

Elemental			
Análisis	Método	Cómo se recibe	Seco
Humedad Total (% en peso)	ASTM D 3302	1,83	
Cenizas (% en peso)	ASTM D 3174	35,15	35,81
Carbono (% en peso)	ASTM D 5373	31,75	32,34
Hidrogeno (% en peso)	ASTM D 5373	4,79	4,88
Nitrogeno (% en peso)	ASTM D 5373	5,74	5,84
Azufre (% en peso)	ASTM D 4239	0,81	0,83
Oxigeno (% en peso)	ASTM D 5373	19,93	20,30

Cálculo	Método	Cómo se recibe	Seco
Poder Calorífico Inferior (BTU/lb)	ASTM D 5865	5679	5785

Anexo 2. Resultados del Análisis próximo y elemental del cacao.

 	FACULTAD DE INGENIERÍA Escuela de Ingeniería de Recursos Naturales y Medio Ambiente Laboratorio de Combustión Combustible	ENTREGA DE RESULTADOS ANÁLISIS PRÓXIMO Y ELEMENTAL	
			UNIVERSIDAD CATÓLICA DE MANIZALES

Informe N°:	235-18	Cliete:	UNIVERSIDAD CATÓLICA DE MANIZALES
Fecha recepción (a-m-d):	2018-10-23	Dirección cliete:	Carrera 23 # 60-63 Av Santander Manizales - Caldas
Fecha inicio de análisis (a-m-d):	2018-10-23		
Fecha final de análisis (a-m-d):	2018-11-02	Cód. identificación del cliete:	CACAO
Fecha elaboración inf. (a-m-d):	2018-11-02		
Tipo de muestra:	Sólida	Cód. identificación del laboratorio:	SV092-02

Próximo			
Análisis	Método	Cómo se recibe	Seco
Humedad Total (% en peso)	ASTM D 3302	6,90	
Materia Volatil (% en peso)	ASTM D 3175	64,07	68,82
Cenizas (% en peso)	ASTM D 3174	9,18	9,86
Carbon Fijo (% en peso)	ASTM D 3172	19,85	21,32
Poder Calorífico Superior (kcal/kg)	ASTM D 5865	3911,1	4200,7
Poder Calorífico Superior (BTU/lb)	ASTM D 5865	7040	7561
Azufre (% en peso)	ASTM D 4239	0,27	0,28

Elemental			
Análisis	Método	Cómo se recibe	Seco
Humedad Total (% en peso)	ASTM D 3302	6,90	
Cenizas (% en peso)	ASTM D 3174	9,18	9,86
Carbono (% en peso)	ASTM D 5373	42,27	45,40
Hidrogeno (% en peso)	ASTM D 5373	4,97	5,33
Nitrogeno (% en peso)	ASTM D 5373	1,22	1,31
Azufre (% en peso)	ASTM D 4239	0,27	0,28
Oxigeno (% en peso)	ASTM D 5373	35,21	37,81

Cálculo	Método	Cómo se recibe	Seco
Poder Calorífico Inferior (BTU/lb)	ASTM D 5865	6497	6978

Anexo 3. Boletín Tips cuidado del agua.



CUIDA DEL AGUA

EL AGUA, UN RECURSO VITAL.

Cuidar el agua, es cuidar la vida!

El agua es una fuente de vida insustituible y fundamental para el desarrollo de la sociedad. Además de ser esencial, el agua es un recurso agotable y cada vez más escaso a nivel mundial.

Por ello, si logramos disminuir el consumo de agua potable, contribuiremos a preservar el medio ambiente y a mantener la calidad del servicio. Al mismo tiempo, podremos favorecer nuestra condición de vida y construir un importante vínculo solidario.

"El agua es crítica para el desarrollo sostenible, incluyendo la integridad del medio ambiente y el alivio de la pobreza y el hambre, y es indispensable para la salud y bienestar humanos."

-Naciones Unidas

 **Universidad Católica de Manizales**

Carrera 23 No. 60 - 63
Manizales, Caldas - Colombia
www.ucm.edu.co

ALCALDÍA DE VICTORIA
UNIVERSIDAD CATÓLICA DE MANIZALES

ALGUNOS TIPS PARA EL CUIDADO DEL AGUA.

Simples acciones que ayudan.

- Al lavar los platos no dejes la llave abierta. Utilizá el tapón o un recipiente y ahorrarás hasta 50 litros por lavado.
- Al ducharte, si cerras la llave del agua al momento de enjabonarte ahorras entre unos 10 a 12 litros.
- Usa sistemas de control del agua en el sanitario, si coloca una botella llena de arena en el tanque, ahorrarás litro y medio de agua cada vez que tires de la cadena.
- Si utilizas el sanitario como papelera, desperdiciarás mucha agua. Tira de la cadena solamente cuando sea necesario.
- Reduce al mínimo la evaporación regando las plantas durante las horas tempranas de la mañana o en las noches, cuando las temperaturas están más frescas y los vientos son más ligeros.
- No arrojes el aceite usado por el lavaplatos pues este tapona las tuberías y contamina las fuentes hídricas.



El agua es vital para los seres humanos



El agua es el principio de toda la vida en el planeta



Cuidando el agua, también cuidas tu bolsillo