

Artículo científico

Implementación de un reactor tipo UASB para el tratamiento del aguamiel

Ana Rufina Herrera Soto

Ingeniera Química, M.Sc. Ingeniería Sanitaria, ERIS-USAC, Guatemala

Dirección para recibir correspondencia: herrerana_29@yahoo.com

Recibido: 27 de abril de 2017 Aceptado: 31 de julio de 2017

Resumen

Este artículo presenta los resultados del trabajo de investigación cuyo objetivo fue evaluar la posibilidad de utilizar un reactor anaeróbico de flujo ascendente (UASB por sus siglas en inglés) para tratar el aguamiel (agua residual que se obtiene luego de utilizarla para lavar, despulpar y fermentar los granos de café), aumentando su potencial de hidrógeno y disminuyendo su carga orgánica. El reactor, diseñado a escala laboratorio, funcionó con un tiempo de retención de 54.67 horas. El aguamiel que ingresaba en él tenía un potencial de hidrógeno promedio de 3.51 unidades, y al salir del reactor presentaba un valor promedio de 3.74 unidades, lo cual significa que el tratamiento fue capaz de aumentar el potencial de hidrógeno del aguamiel en un 6%, lo cual no fue suficiente para alcanzar un potencial de hidrógeno que pudiera ser considerado como neutro.

Palabras clave: Beneficio húmedo, potencial de hidrógeno, alcalinidad, DQO, DBO₅.

Abstract

This article presents the results of the investigation project that had as objective the evaluation of the implementation of an upflow anaerobic sludge blanket reactor (UASB) for the treatment of coffee processing wastewater (obtained after using the water for washing the coffee beans, removing the pulp and doing the fermentation), evaluating if this reactor is capable of increasing the value of the hydrogen potential and decreasing the amount of organic matter contained in the wastewater. The reactor was designed at a laboratory scale, and worked with a retention time of 54.67 hours. The coffee wastewater that entered into it, had an average hydrogen potential of 3.51 units, and the outlet has an average hydrogen potential of 3.74 units, which means that the treatment was capable of increasing the hydrogen potential in 6%, but the wastewater didn't achieve the neutrality range.

Keywords: Coffee milling, hydrogen potential, alkalinity, COD, BOD₅.

Introducción

Para llevar a cabo esta investigación se diseñó un reactor anaeróbico, tipo UASB, a escala laboratorio. Para construirlo se utilizaron piezas de PVC, y para mantener una alimentación continua hacia él, se utilizó una bomba peristáltica.

La evaluación del funcionamiento del reactor se llevó a cabo monitoreando el potencial de hidrógeno, la alcalinidad, la DBO₅ y la DQO del aguamiel que ingresaba y salía del reactor.

Los resultados obtenidos mostraron que, aunque el reactor lograba aumentar el potencial de hidrógeno del aguamiel, este aumento no era lo suficientemente grande como para llevar al agua a un rango que pudiera ser considerado neutro, es decir, ninguna muestra alcanzó un potencial de hidrógeno de 7 unidades.

Antecedentes

Uno de los procesos de la industria de café que tiene mayor impacto sobre el medio ambiente, es al que son sometidos los granos de café en los beneficios húmedos, en donde los granos son despulpados y clasificados, para luego ser secados; produciendo como resultado de este proceso, agua residual con un alto contenido de materia orgánica, y un potencial de hidrógeno bajo.

Tradicionalmente, este tipo de agua residual, denominada aguamiel, es tratada mediante la adición de cal.

En la actualidad se llevan a cabo estudios para determinar la factibilidad de utilizar otro tipo de tratamientos, que pudieran mejorar los resultados que ofrece la adición de cal, incluso reduciendo la carga orgánica que arrastra esta agua residual.

En la Escuela Regional de Ingeniería Sanitaria y Recursos hidráulicos, de la Universidad de San Carlos de Guatemala, se han llevado a cabo dos investigaciones, con el fin de estudiar posibles tipos de tratamiento para el aguamiel. Una de estas investigaciones es la de la Ing. Claudia Cerrato, quien evaluó la posibilidad de utilizar bicarbonato de sodio e hidróxido de calcio para neutralizar el potencial de hidrógeno de este tipo de agua residual. En tanto que, los ingenieros Blanca Alas y Marco Moreno, utilizaron un lecho de roca caliza, a través del cual hicieron pasar el aguamiel, para determinar si al estar en contacto con las piedras, el agua obtendría los compuestos alcalinos necesarios para aumentar su potencial de hidrógeno.

En China, Yang et al. investigaron la posibilidad de utilizar un reactor tipo Batch para modificar el potencial de hidrógeno de aguamiel y generar metano, a partir de la degradación de las proteínas contenidas en el agua residual.

Por lo tanto, para llevar a cabo la investigación que se presenta en este artículo, se planteó la hipótesis de que era posible utilizar un reactor anaeróbico, tipo UASB, alimentado de forma continua, para modificar el potencial de hidrógeno del aguamiel, con el fin de que este parámetro alcanzara un rango que pudiera ser considerado neutro.

Metodología

El reactor utilizado en la investigación fue construido con PVC, y conectó a una bomba peristáltica.

Los reactores tipo UASB funcionan a partir de la degradación de la materia orgánica, ocasionada por la acción de los microorganismos presentes en un manto de lodos que se encuentra en su interior, este manto se empieza a formar con el funcionamiento del dispositivo, y conforme pasa el tiempo de operación, los lodos se van depositando en el fondo de la estructura, en tanto que en la parte superior sale el agua tratada. Para evitar que los lodos sean arrastrados con el agua tratada, se colocan deflectores en la parte superior del reactor. Además se instala una campana que permite atrapar el biogás generado como producto de las reacciones de degradación.

El reactor construido para esta investigación fue inoculado con lodos provenientes del UASB que funciona en la planta de tratamiento de aguas residuales domésticas “Ing. Arturo Pazos Sosa”.

La cantidad de aguamiel que ingresaba al UASB fue dosificada mientras arrancaba el funcionamiento del reactor. Esto se hizo debido a que los microorganismos del manto de lodos solo habían estado expuestos a medios más alcalinos que el aguamiel, y exponerlos a un tipo de agua más ácida, podría matarlos. La dosificación se hizo de manera en que, al iniciar la operación solo ingresaba agua residual doméstica, luego se agregó un 25% de aguamiel, a continuación un 50%, y así sucesivamente hasta que solo ingresaba aguamiel al sistema.

La supervivencia de los microorganismos podría haber sido evaluada de dos maneras: observando la producción de biogás, o monitoreando la magnitud de la DQO del agua a la entrada y a la salida del reactor. La producción de biogás dentro del reactor constituiría una prueba de que las reacciones de degradación de materia orgánica seguían ocurriendo, ya que el biogás es un producto de esta reacción, sin embargo la producción de biogás fue insignificante, y por lo tanto se tomó como parámetro de evaluación la magnitud de la DQO del agua; si esta disminuía indicaba que los microorganismos aún seguían degradando la materia orgánica.

Como parámetros de evaluación del funcionamiento del reactor se analizó el cambio del potencial de hidrógeno, el cambio de la alcalinidad, la DQO y la DBO₅. Como se mencionó anteriormente, se evaluó, estadísticamente, si el tratamiento del aguamiel modificaba de forma significativa el valor del potencial de hidrógeno, considerando como un valor neutro una magnitud de 7 unidades.

Los resultados obtenidos experimentalmente, fueron analizados utilizando la prueba de comparación de medias apareadas, realizada bajo los criterios que se muestran en la tabla 1. Esta prueba estadística permitió determinar si existía o no un cambio significativo en la magnitud del potencial de hidrógeno de las muestras analizadas.

Tabla 1 Hipótesis estadísticas

Comparador	T de Student
Nivel de significancia	5%
Hipótesis nula	La magnitud del potencial de hidrógeno no es la misma a la entrada y a la salida del tratamiento
Hipótesis alterna	La magnitud del potencial de hidrógeno es distinta a la entrada

Comparador	T de Student
Nivel de significancia	5%
	y a la salida del tratamiento

Resultados

Descripción del reactor

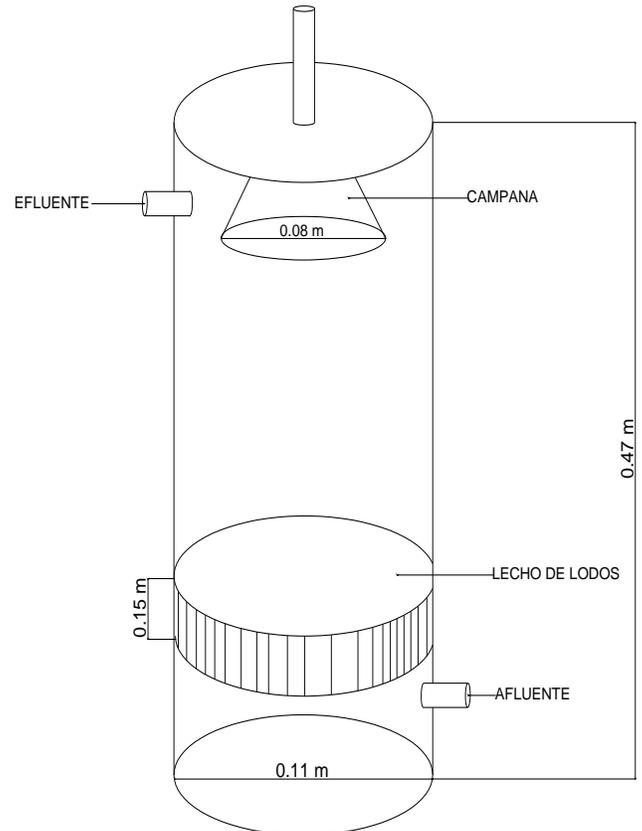
El reactor fue diseñado para trabajar con un tiempo de retención de 54.67 horas, magnitud que supera en gran medida los tiempos de retención recomendados tradicionalmente, que oscilan entre 8 y 10 horas. Se decidió trabajar con un tiempo de retención de esta magnitud, debido a que planteó la posibilidad de que un mayor tiempo de retención favorecería la degradación de las proteínas contenidas en el agua miel.

Como se mencionó anteriormente, el reactor se diseñó para operar a escala laboratorio, y se construyó con materiales de PVC. Las dimensiones del reactor construido se muestran en la tabla 2 y en la figura 1.

TABLA 2 Características del reactor tipo UASB para el tratamiento de agua miel

Características	Magnitud
Escala	Laboratorio
Volumen efectivo	0.0045 m ³
Diámetro	4 pulgadas (0.11 metros)
Tiempo de retención de operación en el trabajo de investigación	54.67 horas
Caudal de operación en el trabajo de investigación	0.2 L/h
Volumen de lodos	1.5 L

Figura 1. Reactor anaeróbico



En la parte superior del reactor se colocó un embudo, que funcionaba como una campana, para poder conducir el biogás que pudiera generarse. Además se instalaron reflectores, para evitar que el agua arrastrara los lodos generados.

Para dosificar el agua que ingresaba al UASB se utilizó una bomba peristáltica, la cual se conectó con un depósito, en donde se encontraba almacenada la muestra de aguamiel que sería tratada. La bomba peristáltica utilizada, permitía controlar el caudal con el cual se alimentaba el aguamiel al reactor.

Además, es necesario tomar en cuenta que en la alimentación del reactor fue necesario colocar válvulas anti retorno, ya que según el funcionamiento de la bomba peristáltica, era difícil mantener el agua dentro del reactor.

También fue necesario colar el agua que ingresaba al reactor, debido a que las muestras de aguamiel contenían una alta cantidad de materiales flotantes, que podían obstruir el paso del agua a través de las

válvulas anti retorno, o en los acoples utilizados para fijar la manguera de la bomba peristáltica. Los análisis realizados al aguamiel, fueron hechos una vez el agua había sido colada.

La principal variable de estudio de esta investigación fue el potencial de hidrógeno de las muestras. Los

resultados de la medición de este parámetro en las muestras tratadas en el reactor se muestran en la tabla 3 y en la figura 2, las cuales permiten comparar los valores del potencial de hidrógeno del aguamiel a la entrada y a la salida del tratamiento.

Figura 2 Cambio del potencial de hidrógeno

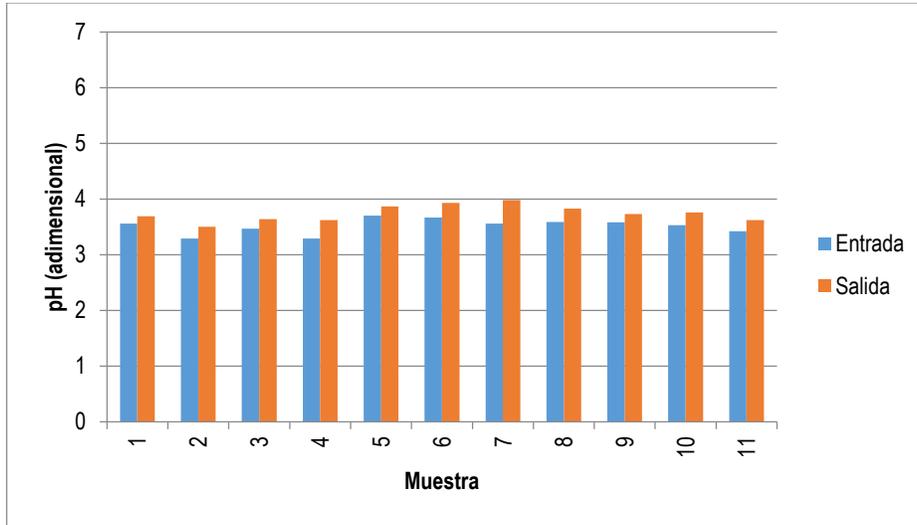


TABLA 3 Monitoreo del cambio del potencial de hidrógeno de las muestras de agua miel

#	pH entrada (adimensional)	pH salida (adimensional)	Cambio pH (adimensional)	Muestra
1	3.56	3.69	0.13	100% de aguamiel25/1/2016 (agua de lavado)
2	3.29	3.5	0.21	100% de aguamiel24/02/2016
3	3.7	3.87	0.17	100% de aguamiel17/03/2016
4	3.47	3.64	0.17	100% de aguamiel(muestra filtrada) 02/03/2016

#	pH entrada (adimensional)	pH salida (adimensional)	Cambio pH (adimensional)	Muestra
5	3.29	3.62	0.33	100% de aguamiel(muestra filtrada) 08/03/2016
6	3.67	3.93	0.26	100% de aguamiel(muestra filtrada) 31/03/2016
7	3.56	3.98	0.42	100% de aguamiel(muestra filtrada) 08/04/2016
8	3.59	3.83	0.24	100% de aguamiel(muestra filtrada) 11/04/2016
9	3.58	3.73	0.15	100% de aguamiel(muestra filtrada) M1 (11/2+2/3)
10	3.53	3.76	0.23	100% de aguamiel(muestra filtrada) M2 (8/3+31/3)
11	3.42	3.62	0.2	100% de aguamiel(muestra filtrada) M3 (31/3+2/3)

En las tablas 4 y 5 se muestran los resultados de evaluar el contenido de materia orgánica en las muestras de aguamiel.

Tabla 4 Monitoreo del cambio de la DQO de las muestras de aguamiel

DQO (mg/L) Entrada	DQO (mg/L) Salida	Condición del agua	Cambio DQO (mg/L)	Eficiencia de remoción (%)
37,000.00	21,800.00	100% de agua miel 25/01/2016	15,200.00	41.08
27,800.00	31,000.00	100% de agua miel 24/02/2016	-3,200.00	+11.51
28,500.00	22,000.00	100% de agua miel 17/02/2016	6,500.00	22.81
21,100.00	16,600.00	100% de agua miel (muestra filtrada) 02/03/2016	4,500.00	21.33

DQO (mg/L) Entrada	DQO (mg/L) Salida	Condición del agua	Cambio DQO (mg/L)	Eficiencia de remoción (%)
15,200.00	17,940.00	100% de agua miel (muestra filtrada) 08/03/2016	-2,740.00	+18.03
33,200.00	20,460.00	100% de agua miel (muestra filtrada) 31/03/2016	12,740.00	38.37
14,700.00	14,640.00	100% de agua miel (muestra filtrada) 08/04/2016	60.00	0.41
10,900.00	14,020.00	100% de agua miel (muestra filtrada) 11/04/2016	-3,120.00	+28.62
30,100.00	18,180.00	100% de agua miel (muestra filtrada) (M1 17/2+2/3)	11,920.00	39.60
22,400.00	19,100.00	100% de agua miel (muestra filtrada) M2	3,300.00	14.73

Nota: (+) muestras en las cuales la DQO aumentó

Tabla 5 Monitoreo del cambio de la DBO₅ de las muestras de aguamiel

DBO ₅ Entrada (mg/L)	DBO ₅ Salida (mg/L)	Condición del agua	Cambio DBO ₅ (mg/L)	Eficiencia de remoción (%)
29,000.00	13,660.00	100% agua miel (25/01/2016)	15,340.00	52.90
28,000.00	13,100.00	100% agua miel (24/02/2016)	14,900.00	53.21
44,100.00	13,340.00	100% agua miel (02/03/2016)	30,760.00	69.75
27,300.00	12,980.00	100% agua miel (17/03/2016)	14,320.00	52.45
2,266.44	17,231.61	100% agua miel (08/03/2016)	-14,965.17	+6.60

DBO ₅ Entrada (mg/L)	DBO ₅ Salida (mg/L)	Condición del agua	Cambio DBO ₅ (mg/L)	Eficiencia de remoción (%)
5,099.49	11,740.00	100% agua miel (08/04/2016)	-6,640.51	+130.22
9,565.71	11,965.47	100% agua miel (31/03/2016)	-2,399.76	+25.08
10,740.00	11,240.00	100% agua miel (11/04/2016)	-500.00	+46.55
19,231.41	11,732.16	100% agua miel M1	7,499.25	38.99
12,732.06	13,132.02	100% agua miel M2	-399.96	+31.42
18,798.12	19,931.34	100% agua miel M3	-1,133.22	+6.03

Nota: (+) muestras en las cuales la DBO₅ aumentó

Además de medir la acidez de las muestras, por medio del potencial de hidrógeno, se determinó la alcalinidad de las muestras, como se muestra en la Tabla 5.

Tabla 6 Monitoreo del cambio de alcalinidad de las muestras de aguamiel

Alcalinidad Entrada(mg/L CaCO ₃)	Alcalinidad Salida (mg/L CaCO ₃)	Muestra	Cambio (mg/L)
3,800.00	1,560.00	17/02/2016	-2,240.00
3,400.00	1,920.00	02/03/2016	-1,480.00
4,000.00	2,160.00	08/03/2016	-1,840.00
4,600.00	3,040.00	31/03/2016	-1,560.00
5,600.00	2,680.00	08/04/2016	-2,920.00
3,600.00	2,040.00	11/04/2016	-1,560.00
12,600.00	3,080.00	M1	-9,520.00
13,200.00	3,600.00	M2	-9,600.00
13,000.00	3,480.00	M3	-9,520.00

Análisis de resultados

Las muestras de aguamiel utilizadas en esta investigación, tenían un potencial de hidrógeno promedio de 3.51 unidades; como se puede observar en la figura No.2, el potencial de hidrógeno de las muestras se incrementó luego de pasar por el tratamiento en el UASB, aumentando hasta un valor promedio de 3.74 unidades. Esto implicaría que la degradación de la materia orgánica contenida en esta agua residual, si provocaría la formación de compuestos que neutralizarían la acidez de las muestras.

El cambio en el potencial de hidrógeno de las muestras de aguamiel fue confirmado, estadísticamente, por medio de una comparación de medias apareadas (potencial de hidrógeno del aguamiel al ingresar al UASB y potencial de hidrógeno del aguamiel al salir del UASB). Esta prueba se realizó con un nivel de confianza del 95%, y permitió determinar que el tratamiento con el reactor anaeróbico si modificó la magnitud del potencial de hidrógeno, aumentándolo. El tratamiento tuvo una eficiencia promedio del 6%, en cuanto al incremento de la magnitud de este parámetro.

Como se puede observar en la figura 2, ninguna de las muestras tratadas en el UASB, alcanzó, al salir de él, un potencial de hidrógeno que pudiera ser considerado como neutro, es decir aproximadamente 7 unidades. Por lo tanto, si bien el tratamiento modifica la acidez del aguamiel, no resuelve completamente el problema, por lo cual sería necesario llevar a cabo investigaciones evaluando la inferencia del tiempo de retención del aguamiel dentro del reactor, sobre el cambio provocado en el valor del pH de las muestras tratadas.

Es importante notar que la magnitud de la alcalinidad disminuyó, pasando de un valor promedio de 6,350.00 mg/L de carbonato de calcio a un valor de 2,510.00 mg/L del mismo compuesto. Para provocar un aumento significativo de la magnitud del potencial de hidrógeno, al descomponer las proteínas del aguamiel, se debieron de liberar moléculas de carbonato que aumentarían la concentración de la alcalinidad, medida como carbonato de calcio, en el agua miel, neutralizando el potencial de hidrógeno. Pero es necesario tomar en cuenta que no se determinaron las concentraciones de nitrógeno amoniacal y orgánico, que podrían haber sido utilizadas como indicadores de la concentración de proteínas en el aguamiel. Evaluar estos dos

parámetros, permitirían correlacionar la concentración de proteínas en el aguamiel con el cambio del potencial de hidrógeno de la misma.

Si bien, experimentalmente se pudo constatar la formación de gas, en la parte superior del agua que se encontraba dentro del reactor (formación de burbujas), la poca cantidad de gas formado imposibilitó su medición. Por este motivo se utilizó el monitoreo de la magnitud de la DQO, para determinar si el reactor seguía funcionando o no de manera adecuada. El criterio para evaluar esto era observar si el valor de la DQO del agua incrementaba luego de pasar por el UASB, si esto sucedía indicaba que el reactor había dejado de funcionar de manera adecuada, por el contrario, si el valor de la DQO decrecía implicaba que los microorganismos presentes en los lodos seguían degradando la materia orgánica del agua residual que se alimentaba al sistema.

En el caso de la magnitud de la DQO, al hacer la comparación de medias apareadas, se determinó, con un nivel de confianza del 95%, que la magnitud de este parámetro si disminuía. Es decir que el tratamiento presentó una eficiencia de 27%, para disminuir la magnitud de este parámetro, llevando las muestras desde un valor promedio inicial de 22,712.70 mg/L, hasta 17,540.00 mg/L de DQO en el afluente del reactor. Es necesario notar que la carga orgánica del aguamiel, aún después de pasar por el tratamiento en el UASB, seguía siendo elevada, si se compara con la carga orgánica del agua residual doméstica. De nuevo, esto implica que es importante evaluar como afecta el tiempo de retención sobre los resultados del tratamiento que se está investigando.

Al evaluar el cambio de la magnitud de la DBO₅, se obtuvieron resultados contradictorios con la tendencia de la DQO, ya que el análisis estadístico realizado de comparación de medias apareadas, mostró, con un nivel de confianza del 95%, que el valor de la DBO₅ no cambiaba significativamente. En seis de las muestras analizadas el valor de la DBO₅ aumentó, lo cual se puede atribuir al hecho de que el aguamiel pasó mucho tiempo retenida dentro del reactor, lo cual pudo provocar que la calidad de esta agua se degradara más, ya que prácticamente estaba estancada, si se compara su velocidad de funcionamiento, con la de otros reactores con tiempos de retención menores.

Para llevar a cabo una mejor medición del volumen generado de gas dentro del reactor, se recomienda instalar un manómetro tipo Bourdon. Además es

necesario considerar la posibilidad de implementar análisis de actividad metanogénica (AME) para evaluar la capacidad de producción de biogás, a partir del lodo utilizado en el reactor.

Conclusiones

El UASB, funcionando con un tiempo de retención de 54.67 horas, logró aumentar el potencial de hidrógeno del aguamiel, que ingresaba con un valor promedio de 3.51 unidades, hasta un valor 3.74, lo cual implica una eficiencia del 6% en el cambio del pH. Este cambio no es suficiente para llevar el potencial de hidrógeno del agua a un nivel que pueda ser considerado neutro.

Las muestras de aguamiel que ingresaban al reactor tenían una concentración de carbonatos de calcio promedio de 6,350.00 mg/L, y a la salida del tratamiento la magnitud de este tratamiento fue de 2,510.00 mg/L, es decir que el UASB modificó en un 55% la alcalinidad de las muestras.

El reactor tipo UASB llevó las muestras de aguamiel tratadas en él, desde un valor promedio de DQO de 22,712.00 mg/L, hasta un valor promedio en el afluente de 17,540.00 mg/L de DQO. Este cambio implica que el valor de la DQO se redujo en un 27%.

El tratamiento del aguamiel con el UASB, llevó la magnitud de la DBO₅ de las muestras desde un valor promedio de 15,316.65 mg/L, hasta un valor de 13,789.08 mg/L. Sin embargo, las pruebas estadísticas realizadas mostraron que el cambio en la magnitud de este parámetro no fue significativo.

Agradecimientos

Esta investigación se llevó a cabo gracias al financiamiento de la Dirección General de Investigación de la Universidad de San Carlos, y al valioso apoyo de ANACAFÉ.

Referencias

- Alas, B., y Moreno, M., (2013). *Evaluación de la eficiencia de modelos de experimentales de roca caliza y laguna facultativa, a escala laboratorio, para el ajuste del potencial de hidrógeno y la remoción de la carga contaminante de las aguas mieles de un beneficio húmedo tecnificado de café* (Tesis de maestría). Universidad de San Carlos de Guatemala, Guatemala.
- Cerrato, C., (2013). *Neutralización del potencial de hidrógeno del agua miel de un beneficio húmedo tecnificado de café* (Tesis de

maestría). Universidad de San Carlos de Guatemala, Guatemala.

- Herrera, A. y Montes, A., (2017). *Diseño, construcción y evaluación de un reactor anaeróbico para el tratamiento de las aguamiel de un beneficio húmedo de café* (Tesis de maestría). Universidad de San Carlos de Guatemala, Guatemala.
- Jingxia, y Stewart, M., Xiaoliang, D. (2014, Agosto). *“Cog” anaerobic process for the treatment and valorization of coffee processing wastewater*. Ponencia presentada en la quinta conferencia de Ingeniería de desechos y valorización de la biomasa. Rio de Janeiro, Brazil.
- Romero Rojas, J. (2004). *Tratamiento de Aguas Residuales, Teoría y principios de diseño*. Editorial Escuela Colombiana de Ingeniería. Colombia.

Información sobre el autor

Ana Rufina Herrera Soto, Ingeniera Química, graduada de la Universidad de San Carlos de Guatemala en el año 2014.

Estudios en Ingeniería Sanitaria, en el programa de Master científico impartido por la Escuela Regional de Ingeniería Sanitaria, de la Universidad de San Carlos.