

Informe final proyecto de investigación 2022

Dirección General de Investigación –DIGI-

Desarrollo industrial

(nombre del programa universitario de investigación de la Digi)

Tratamiento de agua residual de la industria del café: elevación del potencial de hidrógeno utilizando carbón como adsorbente.

nombre del proyecto de investigación

4.8.63.0.48

Partida presupuestaria

DES1-2022

código del proyecto de investigación

Facultad de Ingeniería Centro de Investigaciones de Ingeniería
unidad académica o centro no adscrito a unidad académica avaladora

MSc. Ing. Ana Rufina Herrera Soto

nombre del coordinador del proyecto y equipo de investigación contratado por Digi

Ciudad de Guatemala, 28 de febrero del 2023

lugar y fecha de presentación del informe final dd/mm/año

Autoridades

Dra. Alice Burgos Paniagua
Directora General de Investigación

Ing. Agr. MARN Julio Rufino Salazar
Coordinador General de Programas

Ing. Liuba Cabrera de Villagrán
Coordinadora del Programa de Investigación

Autores

MSc. Ing. Ana Rufina Herrera Soto

Colaboradores:

Ing. Agr. Roberto Soto (ANACAFÉ)

MA. Ing. William Eduardo Fagiani Cruz (INDETEIQ, USAC)

Universidad de San Carlos de Guatemala, Dirección General de Investigación (Digi), 2022. El contenido de este informe de investigación es responsabilidad exclusiva de sus autores.

Esta investigación fue cofinanciada con recursos del Fondo de Investigación de la Digi de la Universidad de San Carlos de Guatemala a través de la partida presupuestaria 4.8.63.0.48 con código DES1-2022 en el Programa Universitario de Investigación Desarrollo industrial.

Los autores son responsables del contenido, de las condiciones éticas y legales de la investigación desarrollada.



Universidad de San Carlos de Guatemala
Dirección General de Investigación



1 Índice general

1	Índice general	3
	Índice de figuras	4
	Índice de tablas	6
2	Resumen y palabras claves	9
3	Introducción.....	11
4	Planteamiento del problema	13
5	Delimitación en tiempo y espacio	14
	5.1 Delimitación en tiempo	14
	5.2 Delimitación espacial	14
6	Marco teórico.....	15
	6.1 Beneficiado húmedo de café.....	15
	6.2 Características del agua residual de la industria del café.....	15
	6.3 Compuestos ácidos en el agua miel	16
	6.4 Reglamento de las descargas y reúso de aguas residuales y de la disposición de lodos, acuerdo gubernativo 236-2006.....	16
	6.5 Utilización de agua residual para riego	17
	6.6 Adsorción	18
	6.8 Determinación de Acidez de fenolftaleína.....	20
	6.9 Determinación de la concentración de ácidos orgánicos y volátiles en agua.....	21
	6.10 Carbonización y carbón activado	22
7	Estado del arte	23
8	Objetivos.....	29
9	Hipótesis	30

10	Materiales y métodos (enfoque, métodos, recolección de información, técnicas e instrumentos, procesamiento y análisis de la información)	31
10.1	Enfoque de la investigación	31
10.2	Método	31
10.3	Recolección de información	32
10.4	Técnicas e instrumentos.....	34
10.5	Procesamiento y análisis de la información.....	35
11	Resultados y discusión.....	37
11.1	Resultados	37
11.2	Discusión de resultados.....	42
12	Referencias.....	47
13	Apéndice	53
14	Aspectos éticos y legales	96
15	Vinculación	97
16	Estrategia de difusión, divulgación y protección intelectual	98
17	Aporte de la propuesta de investigación a los ODS:.....	99
18	Orden de pago final (incluir únicamente al personal con contrato vigente).....	100
19	Declaración del Coordinador(a) del proyecto de investigación.....	100
20	Aval del Director(a) del instituto, centro o departamento de investigación o Coordinador de investigación del centro regional universitario	101
21	Visado de la Dirección General de Investigación.....	101

Índice de figuras

Figura 1	<i>Potencial de hidrógeno del agua miel antes y después del tratamiento con carbón activado, en distintos intervalos de tiempo.....</i>	37
----------	---	----

Figura 2 <i>Acidez a la fenolftaleína del agua miel antes y después del tratamiento con carbón activado, en distintos intervalos de tiempo.</i>	38
Figura 3 <i>Temperatura de las muestras de agua miel antes y después del tratamiento con carbón activado, en distintos intervalos de tiempo.</i>	39
Figura 4 <i>Potencial de hidrógeno del agua miel antes y después del tratamiento con carbón vegetal, en distintos intervalos de tiempo.</i>	40
Figura 5 <i>Acidez a la fenolftaleína del agua miel antes y después del tratamiento con carbón vegetal, en distintos intervalos de tiempo.</i>	41
Figura 6 <i>Temperatura de las muestras de agua miel antes y después del tratamiento con carbón vegetal, en distintos intervalos de tiempo.</i>	42
Figura 7 <i>Recolección de muestras de agua miel en el beneficio húmedo Nuevo Sendero en Santa Rosa, Guatemala.</i>	76
Figura 8 <i>Recolección de muestras de agua miel en el beneficio húmedo Nuevo Sendero, en Santa Rosa, Guatemala.</i>	77
Figura 9 <i>Refrigeración de muestras de agua miel en laboratorio.</i>	78
Figura 10 <i>Filtración de muestras de agua miel</i>	79
Figura 11 <i>Comparación de agua miel con agua miel filtrada.</i>	80
Figura 12 <i>Muestra de agua miel en contacto con carbón activado comercial.</i>	80
Figura 13 <i>Comparación de muestras de agua miel en distintas etapas del tratamiento.</i>	81
Figura 14 <i>Secado de muestras de residuo de café percolado</i>	82
Figura 15 <i>Muestra de residuo de café percolado luego del proceso de secado</i>	83
Figura 16 <i>Mufla utilizada para la carbonización de residuos de café percolado.</i>	84
Figura 17 <i>Residuo de café percolado seco antes de ser carbonizado en la mufla.</i>	85
Figura 18 <i>Carbonización de residuos de café percolado</i>	86
Figura 19 <i>Residuo de café percolado seco y carbonizado.</i>	87
Figura 20 <i>Muestra de agua miel en contacto con carbón vegetal</i>	88
Figura 21 <i>Medición de potencial de hidrógeno de muestra de agua miel tratada con carbón vegetal.</i>	89
Figura 22 <i>Muestra de agua miel titulada para determinar acidez a la fenolftaleína.</i>	90

Figura 23 Conferencia para el XXVII Congreso Latinoamericano de Estudiantes de Ingeniería Química: Tratamiento del agua residual de la industria del café.....	90
Figura 24 Entrevista radial: Agua residual de la industria del café tratamiento e investigación.	91
Figura 25 Conferencia para el primer congreso de INDETIEQ: Uso de carbón activado para la elevación del potencial de hidrógeno del agua residual de la industria del café.	91
Figura 26 Comprobante de envío de artículo científico a revista Ciencia y tecnología (DIGI USAC)	92
Figura 27 Conferencia para presentar los resultados de la investigación realizada.....	93
Figura 28 Carátula del informe presentado a ANACAFÉ.....	94
Figura 29 Carta de presentación de informe final de la unidad de Investigación, desarrollo tecnológico e innovación de la Escuela de Ingeniería química	95

Índice de tablas

Tabla 1 Potencial de hidrógeno del agua miel antes y después del tratamiento con carbón activado, en distintos intervalos de tiempo.....	53
Tabla 2 Acidez a la fenolftaleína del agua miel antes y después del tratamiento con carbón activado, en distintos intervalos de tiempo.....	55
Tabla 3 Temperatura de las muestras de agua miel antes y después del tratamiento con carbón activado, en distintos intervalos de tiempo.....	57
Tabla 4 Análisis de la varianza para la diferencia del potencial de hidrógeno del agua miel tratada con carbón activado comercial en función del tiempo (covariable: temperatura)	58
Tabla 5 Cuadro de análisis de la varianza para la diferencia del potencial de hidrógeno del agua miel tratada con carbón activado comercial en función del tiempo (covariable: temperatura)	59
Tabla 6 Prueba de Shapiro-Wilks para la diferencia del potencial de hidrógeno del agua miel tratada con carbón activado comercial.....	59
Tabla 7 Prueba de Tukey para la diferencia del potencial de hidrógeno del agua miel tratada con carbón activado comercial en función del tiempo.....	60
Tabla 8 Prueba T (muestras pareadas) para la diferencia del potencial de hidrógeno del agua miel tratada con carbón activado comercial.....	60

Tabla 9 Prueba de Shapiro-Wilks (modificada) para la diferencia del potencial de hidrógeno del agua miel tratada con carbón activado comercial.	60
Tabla 10 Análisis de la varianza para la diferencia de la acidez a la fenolftaleína del agua miel tratada con carbón activado comercial en función del tiempo (covariable: temperatura)	61
Tabla 11 Cuadro de análisis de la varianza para la diferencia de la acidez a la fenolftaleína del agua miel tratada con carbón activado comercial en función del tiempo (covariable: temperatura).....	61
Tabla 12 Prueba de Shapiro-Wilks para la diferencia de la acidez a la fenolftaleína del agua miel tratada con carbón activado comercial.	61
Tabla 13 Prueba de Tukey para la diferencia de la acidez a la fenolftaleína del agua miel tratada con carbón activado comercial en función del tiempo	62
Tabla 14 Prueba T (muestras pareadas) para la diferencia de la acidez a la fenolftaleína del agua miel tratada con carbón activado comercial	62
Tabla 15 Prueba de Shapiro-Wilks (modificada) para la diferencia de la acidez a la fenolftaleína del agua miel tratada con carbón activado comercial.	62
Tabla 16 Potencial de hidrógeno del agua miel antes y después del tratamiento con carbón vegetal, en distintos intervalos de tiempo.....	63
Tabla 17 Acidez a la fenolftaleína del agua miel antes y después del tratamiento con carbón vegetal, en distintos intervalos de tiempo.....	65
Tabla 18 Temperatura de las muestras de agua miel antes y después del tratamiento con carbón vegetal, en distintos intervalos de tiempo	67
Tabla 19 Análisis de la varianza para la diferencia del potencial de hidrógeno del agua miel tratada con carbón vegetal función del tiempo (covariable: temperatura)	68
Tabla 20 Cuadro de análisis de la varianza para la diferencia del potencial de hidrógeno del agua miel tratada con carbón vegetal en función del tiempo (covariable: temperatura).....	69
Tabla 21 Prueba de Shapiro-Wilks para la diferencia del potencial de hidrógeno del agua miel tratada con carbón vegetal.	69
Tabla 22 Prueba de Tukey para la diferencia del potencial de hidrógeno del agua miel tratada con carbón vegetal en función del tiempo	69
Tabla 23 Prueba T (muestras pareadas) para la diferencia del potencial de hidrógeno del agua miel tratada con carbón activado vegetal.	70

Tabla 24 <i>Prueba de Shapiro-Wilks (modificada) para la diferencia del potencial de hidrógeno del agua miel tratada con carbón vegetal.</i>	70
Tabla 25 <i>Análisis de la varianza para la diferencia de la acidez a la fenolftaleína del agua miel tratada con carbón vegetal en función del tiempo (covariable: temperatura)</i>	70
Tabla 26 <i>Cuadro de análisis de la varianza para la diferencia de la acidez a la fenolftaleína del agua miel tratada con carbón vegetal en función del tiempo (covariable: temperatura)</i>	71
Tabla 27 <i>Prueba de Shapiro-Wilks para la diferencia de la acidez a la fenolftaleína del agua miel tratada con carbón vegetal.</i>	71
Tabla 28 <i>Prueba de Tukey para la diferencia de la acidez a la fenolftaleína del agua miel tratada con carbón vegetal en función del tiempo.</i>	72
Tabla 29 <i>Prueba T (muestras pareadas) para la diferencia de la acidez a la fenolftaleína del agua miel tratada con carbón vegetal</i>	72
Tabla 30 <i>Prueba de Shapiro-Wilks (modificada) para la diferencia de la acidez a la fenolftaleína del agua miel tratada con carbón vegetal.</i>	72
Tabla 31 <i>Prueba de Wilcoxon (muestras pareadas) para la diferencia de la acidez a la fenolftaleína del agua miel tratada con carbón vegetal.</i>	73
Tabla 32 <i>Prueba T para muestras independientes comparando el cambio del potencial de hidrógeno provocado por el carbón activado comercial y el carbón vegetal</i>	73
Tabla 33 <i>Prueba de Mann–Whitney–Wilcoxon comparando el cambio del potencial de hidrógeno provocado por el carbón activado comercial y el carbón vegetal</i>	74
Tabla 34 <i>Prueba de Shapiro-Wilks para la comparación de la diferencia provocada en el potencial de hidrógeno del agua miel por el carbón activado y el carbón vegetal.</i>	74
Tabla 35 <i>Prueba T para muestras independientes comparando el cambio de la acidez a la fenolftaleína provocado por el carbón activado comercial y el carbón vegetal</i>	75
Tabla 36 <i>Prueba de Mann–Whitney–Wilcoxon comparando el cambio de la acidez a la fenolftaleína provocado por el carbón activado comercial y el carbón vegetal</i>	75
Tabla 37 <i>Prueba de Shapiro-Wilks para la comparación de la diferencia provocada la acidez a la fenolftaleína del agua miel por el carbón activado y el carbón vegetal.</i>	76

2 Resumen y palabras claves

Se evaluó la posibilidad de utilizar carbón como adsorbente para eliminar moléculas ácidas del agua residual de la industria del café y elevar su potencial de hidrógeno a un rango que pueda ser considerado como neutro y adecuado para la reutilización de este tipo de residuo en el riego de plantaciones. La investigación se llevó a cabo a nivel laboratorio, utilizando carbón activado de venta comercial, y carbón vegetal obtenido a partir del secado y carbonización del residuo de la percolación de café. En ambos casos se expusieron 50 mL de agua miel a 0.24 gramos de carbón, en distintos intervalos de tiempo. Los análisis estadísticos, realizados con un nivel de significancia del 5%, mostraron que el potencial de hidrógeno del agua miel se eleva al ponerse en contacto con el carbón activado o con el carbón vegetal, pero el potencial de hidrógeno no llega a alcanzar un nivel que pueda ser considerado como neutro. Modificar el tiempo de contacto entre el agua miel y el material adsorbente, en un rango de 30 minutos a 180 minutos, no provoca cambios en los resultados obtenidos. Al comparar los cambios provocados por el carbón activado y el carbón vegetal, se pudo concluir que el carbón activado provoca un mayor cambio en el potencial de hidrógeno del agua miel.

Aguamiel, acidez, pH, café, carbón, carbón activado, carbón vegetal, residuo, percolación.

Abstract and keyword

The possibility of using carbon as an adsorbent in the treatment of coffee wastewater was evaluated in this investigation, with the objective of using this material to remove acid molecules and increase the hydrogen potential of this kind of wastewater bringing it to a level that can be considered as neutral and therefore could be used in plant irrigation. The investigation was conducted at a laboratory scale, using commercial activated carbon, and vegetable carbon obtained from the waste of spent coffee, which was dried and carbonized. In both cases 50 mL of coffee wastewater were exposed to 0.24 grams of carbon, in different time intervals. Statistical analyses were performed at a 5% significance level and allowed to conclude that the exposition of the coffee wastewater to activated carbon or vegetable carbon can increase her hydrogen potential, but this parameter don't reach a level that can be considered as neutral. The modification of the amount of

time in which the coffee wastewater was exposed to the adsorbent material, in a range between 30 minutes and 180 minutes, doesn't change the results. The comparison between the effect of the activated carbon and the vegetable carbon shows that the activated carbon produces a bigger change in the hydrogen potential of the coffee wastewater.

Coffee wastewater, acidity, pH, carbon, activated carbon, vegetable carbon, residue, spent coffee.

3 Introducción

La Guía ambiental para el sector café de Guatemala (2018) explica que el café es uno de los productos agroindustriales más importantes del país, capaz de generar empleos y aportar de forma significativa al Producto Interno Bruto. Para el año 2018, se reportaba que en Guatemala existían más de 305 mil hectáreas cultivadas con café (Guía ambiental para el sector café de Guatemala, 2018).

Según la Asociación Nacional del Café (2011), el método más utilizado para procesar el café en Guatemala es el del beneficio húmedo, método que puede llegar a consumir entre 40 y 530 galones de agua para procesar 100 libras de café. Esto genera aguas residuales, conocidas como aguas mieles, que según la Asociación Nacional del Café se caracterizan por tener un bajo potencial de hidrógeno y una alta carga orgánica. El Reglamento de las descargas y reúso de aguas residuales y de la disposición de lodos (2006) indica que todas las aguas residuales generadas en Guatemala deben ser monitoreadas y sometidas a un tratamiento, inclusive si van a ser reutilizadas. Este es el caso de las aguas mieles, las cuales deberían de ser reutilizadas en actividades de riego, según recomendaciones de la Guía ambiental para el sector café de Guatemala (2018).

Autores como Devi et al. (2008) han evaluado las características del agua miel, reportando que esta agua residual podría tener en promedio un potencial de hidrógeno de 4.5 unidades; en tanto que Woldesenbet et al. (2015), reportan que el potencial de hidrógeno del agua miel que evaluaron en su investigación era de 3.8 unidades. Los valores de potencial de hidrógeno reportados en la literatura son bajos en comparación con el rango requerido por el Reglamento de las descargas y reúso de aguas residuales y de la disposición de lodos (2006), en el que se establece que el agua residual debe tener un potencial de hidrógeno de entre 6 y 9 unidades. A raíz de esto se hace necesario evaluar tratamientos que puedan elevar el potencial de hidrógeno del agua miel, para que este alcance el rango requerido en la normativa antes mencionada.

Por otra parte, es necesario tomar en cuenta que, para reutilizar el agua residual con fines de riego agrícola, se recomienda analizar su calidad para determinar si es adecuada para tal fin. Uno de los parámetros que deben ser evaluados y acondicionados antes de reutilizar el agua residual es el potencial de hidrógeno. De acuerdo con Bastian y Murray (2012), el agua reutilizada para riego debe tener un potencial de hidrógeno entre 6.5 y 8.4 unidades.

Se han realizado investigaciones previas con la finalidad de ofrecer un tratamiento a las aguas residuales de la industria del café, enfocándose en mejorar características en específico de este tipo de agua residual. Por ejemplo, Devi et al. (2008) evaluaron la posibilidad de reducir la carga orgánica del agua miel utilizando carbón activado como adsorbente. Por su parte, Carrero y Tapia (2019) experimentaron con la fitorremediación, evaluando la efectividad del *Eichhornia crassipes* M (jacinto de agua) para elevar el potencial de hidrógeno del agua miel.

También se han desarrollado investigaciones en donde se han utilizado microorganismos para acondicionar el agua miel, como es el caso de Pires et al. (2021) quienes reportan que la inoculación del agua miel con una comunidad microbiana provocó una reducción en la carga orgánica del agua miel y un aumento en su potencial de hidrógeno. Ancy et al. (2021) evaluaron los cambios provocados en el color, presencia de sólidos totales disueltos, DQO y potencial de hidrógeno al tratar el agua miel con una lectina aislada de la semilla de *Ricinus communis*; en el caso del potencial de hidrógeno estos investigadores reportan un aumento en este parámetro.

En el caso de este proyecto de investigación se evaluó la posibilidad de utilizar carbón para elevar el potencial de hidrógeno del agua miel. Para ello se experimentó con dos tipos de carbón: carbón activado de venta comercial, y carbón obtenido a partir del residuo de la percolación del café molido. Los experimentos se desarrollaron a nivel laboratorio, la mitad de las muestras se pusieron en contacto con carbón activado, y la otra mitad se puso en contacto con el carbón obtenido de los residuos de percolación. Se evaluó el cambio en el potencial de hidrógeno del agua miel, y el cambio en la acidez a la fenolftaleína. Además, se evaluó la inferencia del tiempo de contacto en la efectividad del tratamiento propuesto.

4 Planteamiento del problema

Según la Asociación Nacional del Café (2011), un beneficio húmedo tradicional de café utiliza entre 40 galones y 530 galones de agua para procesar 100 libras de café, generando aguas residuales (aguas mieles) que deben ser tratadas según las normativas vigentes en Guatemala. El agua utilizada durante el proceso de fermentación se contamina con bacterias que generan compuestos químicos que alteran el potencial de hidrógeno y el oxígeno disuelto en el agua residual (Asociación Nacional del Café, 2011). Investigaciones como la de Torres-Valenzuela et al. (2019), han demostrado la presencia de ácido acético en el agua miel, que junto con otros compuestos ácidos contribuyen a que esta agua residual tenga un bajo potencial de hidrógeno. Por ejemplo, Cerrato (2013) reporta un valor promedio de 4.37 unidades para este parámetro.

La Guía ambiental para el sector café de Guatemala (2018) recomienda que el agua miel sea reutilizada para riego de plantaciones, cumpliendo con los límites señalados en el Reglamento de las descargas y reúso de aguas residuales y de la disposición de lodos (2006) de Guatemala. El reglamento establece que esta agua residual debe tener un potencial de hidrógeno en un rango de 7 a 9 unidades, si va a ser desechada o reutilizada.

Además, es necesario tomar en cuenta que el agua residual reutilizada para el riego de plantaciones requiere de características específicas. Bastian y Murray (2012) recomiendan que el agua que sea reutilizada para riego tenga un potencial de hidrógeno que oscile en un rango de 6.5 a 8.4 unidades. Según Akiça (2004), si el agua residual reutilizada tiene un potencial de hidrógeno fuera del rango antes mencionado, se pueden dañar las plantaciones que están siendo irrigadas.

Lo anterior hace necesario buscar tratamientos para aumentar el potencial de hidrógeno del agua miel. En este proyecto se propuso evaluar si el carbón puede ser utilizado como adsorbente para atrapar las moléculas de compuestos ácidos (como el ácido acético) que reducen el potencial de hidrógeno del agua miel y aumentan su acidez. Se utilizaron dos tipos de carbón: carbón activado (venta comercial) y carbón obtenido a partir de los residuos sólidos generados en la percolación de café, evaluando la idoneidad de estos dos tipos de materiales para llevar a cabo el proceso y alcanzar las condiciones requeridas por el Reglamento de las descargas y reúso de aguas residuales y de la disposición de lodos (2006).

5 Delimitación en tiempo y espacio

5.1 Delimitación en tiempo

Se inició con los trámites administrativos en la primera semana de febrero del. El trabajo de laboratorio se inició en la tercera semana de febrero del 2022. Se finalizó con el trabajo de laboratorio en la primera semana de diciembre del año 2022, y se redactó este informe final en las últimas tres semanas de diciembre del mismo año. Es importante tomar en cuenta que la cosecha del café es una actividad estacional, por lo que no se pudo tener acceso al agua residual que se produce en esta industria durante los meses de mayo, junio, julio, agosto y septiembre.

5.2 Delimitación espacial

Se trabajó con muestras de agua residual provenientes de un beneficio húmedo que opera en Santa Rosa, denominado Nuevo Sendero.

El residuo de café percolado fue proporcionado por personal de Anacafé. El café de percolación utilizado provino de la finca Las Lomas y Anexos, ubicada en Amatitlán, y se categoriza en el perfil Fraijanes Plateau.

El procedimiento experimental y los análisis mencionados en este anteproyecto se llevaron a cabo en el Laboratorio de Físicoquímica, de la Escuela de Ingeniería Química, ubicado en el Campus Central de la Universidad de San Carlos de Guatemala, y en el laboratorio de la empresa Mediciones Ambientales. Debido al cierre de las instalaciones de la Universidad de San Carlos de Guatemala, durante el segundo semestre del 2022, parte del procedimiento experimental se llevó a cabo en la zona 6 de la ciudad de Guatemala.

6 Marco teórico

6.1 Beneficiado húmedo de café:

Para procesar los granos de café se pueden utilizar dos tipos de métodos: el método húmedo y el método seco (Ijanu et al., 2019). En Guatemala, al método húmedo se le denomina “beneficiado húmedo”, en tanto que al método seco se le llama “beneficiado seco”. El agua se utiliza en los beneficios húmedos para despulpar y clasificar los granos de café. De acuerdo con Ijanu et al., el método húmedo se caracteriza por utilizar grandes volúmenes de agua y en consecuencia generar altos volúmenes de agua contaminada.

Según la Asociación Nacional del Café (2011), un beneficio húmedo puede llegar a consumir hasta 530 galones de agua para procesar 100 libras de café. Se estima que en Guatemala operan más de cinco mil beneficios húmedos de café (Asociación Nacional del Café, 2011).

El proceso que se lleva a cabo en un beneficiado húmedo es el siguiente (Asociación Nacional del Café, 2011):

1. Cosecha.
2. Clasificación de granos por densidad.
3. Despulpado.
4. Fermentación.
5. Remoción de mucílago y lavado.
6. Secado
7. Almacenamiento.

La Guía Ambiental Para El Sector Café De Guatemala (2018), indica que las aguas residuales se generan durante los procesos de despulpado, remoción de mucílago y lavado.

6.2 Características del agua residual de la industria del café:

Según la Guía Ambiental Para El Sector Café De Guatemala (2018), las “aguas mieles” son las aguas residuales que se generan en el beneficiado húmedo del café.

Woldesenbet et al. (2015) explican que las aguas residuales del beneficiado húmedo contienen altas concentraciones de materia orgánica y sólidos suspendidos. Según estos

autores, los contaminantes que arrastra el agua miel, aparecen durante el proceso de despulpado. Además, a raíz de la reacción de fermentación de los azúcares en el café, se produce la aparición de ácidos orgánicos y ácido acético, los cuales contribuyen a disminuir el potencial de hidrógeno del agua residual (Woldesenbet et al., 2015). El agua residual de la industria de café se caracteriza por tener altos niveles de carga orgánica, bajos niveles de oxígeno disuelto y alta acidez (Woldesenbet et al., 2015; Asociación Nacional del Café, 2011).

Devi et al. (2008) realizaron una caracterización del agua residual del proceso húmedo del grano de café. Estos autores reportan que el agua miel evaluada en su investigación tenía una demanda química de oxígeno de 22,000 mg/L y una demanda bioquímica de oxígeno de 12,000 mg/L. En esta investigación también se reporta que el agua miel evaluada tenía un potencial de hidrógeno de 4.5 unidades; por su parte, Woldesenbet et al. dicen que el potencial de hidrógeno podría llegar a ser de 3.8 unidades.

6.3 Compuestos ácidos en el agua miel:

Von Enden et al. (2002) explican que el azúcar en el agua miel se fermenta debido a la presencia de microorganismos. Como resultado de la fermentación aparece dióxido de carbono y moléculas de alcohol en esta agua residual. El alcohol reaccionará descomponiéndose en ácido acético, gracias a la acción de las bacterias. Según la investigación de Torres-Valenzuela et al. (2019) el agua residual de la industria de café, fermentada por 24 horas, tiene una concentración de 90 mg/L de ácido acético.

6.4 Reglamento de las descargas y reúso de aguas residuales y de la disposición de lodos, acuerdo gubernativo 236-2006:

La descarga de aguas residuales en la república de Guatemala está normada por el Acuerdo Gubernativo 236-2006. Este acuerdo recibe el nombre de “Reglamento de las descargas y reúso de aguas residuales y de la disposición de lodos”. Además, el Acuerdo Gubernativo 236-2006 contempla la reutilización del agua residual.

Los beneficios de café no están exentos de cumplir con esta normativa, y deben de monitorear y acondicionar la calidad del agua residual que producen. La Guía ambiental para el sector

café de Guatemala (2018) indica que las aguas residuales producidas en el beneficiado húmedo de café deben ser reutilizadas para riego.

Según el Reglamento de las descargas y reúso de aguas residuales y de la disposición de lodos (2006) las aguas mieles se clasifican en la categoría II, es decir que son aguas residuales que se utilizan en el riego de cultivos comestibles. Dada esta clasificación, el acuerdo antes mencionado indica cuales son las características que debe tener esta agua residual para poder ser reutilizada, entre ellas se encuentra su potencial de hidrógeno que debe encontrarse en un rango de 6 a 9 unidades.

6.5 Utilización de agua residual para riego:

El manejo de aguas residuales plantea dos opciones: desecharlas luego de ser tratadas, o reutilizarlas. A nivel mundial, la demanda de acceso a fuentes de agua potable ha crecido, haciendo necesaria la adaptación al uso de fuentes de agua no tradicionales, promoviendo la reutilización (Bastian y Murray, 2012).

Una alternativa para el reúso del agua residual es la irrigación de plantaciones. En estos casos, el uso de agua residual, proveniente de un tratamiento secundario puede reducir el consumo de fertilizantes químicos, pues el agua residual arrastra consigo compuestos que constituyen nutrientes para las plantaciones (Dobrowolski et al., 2008).

El reúso del agua residual para la agricultura está limitado a la calidad del agua a la que se tiene acceso. Los parámetros que deben ser evaluados en este caso son: relación de adsorción de sodio, toxicidad por iones específicos, concentración de nitrato, concentración de bicarbonato, potencial de hidrógeno, entre otros (Bastian y Murray, 2012).

El potencial de hidrógeno puede considerarse como un indicador del contenido de compuestos ácidos en el agua residual. La Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos, en su guía para el reúso de agua residual, publicada por Bastian y Murray (2012), recomienda que el agua que será reutilizada en irrigaciones tenga un potencial de hidrógeno en un rango de 6.5 a 8.4 unidades. Utilizar agua con potenciales de hidrógeno fuera de este rango podría provocar efectos adversos: en el caso del equipo utilizado en la irrigación, se

podrían provocar problemas de corrosión, las plantas también podrían dañarse al exponerse a esta agua residual (Akiça, 2004).

En el caso de Guatemala, el Reglamento de las descargas y reúso de aguas residuales y de la disposición de lodos (2006) permite la reutilización de aguas residuales para la irrigación de plantaciones; pero hace la aclaración de que el agua residual debe tener parámetros específicos antes de ser reutilizada. En el caso del potencial de hidrógeno, este reglamento requiere que el agua tenga un potencial que se encuentre en el rango de 6 a 9 unidades.

La Guía Ambiental Para El Sector Café De Guatemala (2018) recomienda que las aguas mieles, generadas en el beneficiado húmedo, sean utilizadas para riego.

Al utilizar agua miel para regar plantaciones se producen inhibiciones en el desarrollo de las plantas y en el crecimiento de sus raíces, también se provocan alteraciones nucleares y cromosómicas en los ciclos celulares (Aguiar et al., 2016). Lo anteriormente descrito permite concluir que antes de utilizar el agua miel para irrigar plantaciones, es necesario someter a este tipo de agua residual a tratamientos que la acondicionen.

6.6 Adsorción:

LeVan et al. (1997) explican que la adsorción es un fenómeno de transferencia de masa que se lleva a cabo gracias a que ciertas moléculas, que fueron arrastradas por una fase fluida se acumulan en otra fase. La fase fluida se denomina “adsorbato”, en tanto que la fase sobre la que se realiza la acumulación es el “adsorbente” (Mihelcic y Zimmerman, 2012). El hecho de que exista afinidad entre el adsorbente y ciertos adsorbatos permite que se puedan hacer separaciones, retirando de la fase fluida moléculas en específico. Por ejemplo, esta operación se puede utilizar en fases líquidas para eliminar sabores y olores del agua (Treybal, 1955/1980).

El fenómeno de adsorción se puede dar de dos formas: química y física (Levan et al., 1997; Treybal, 1955/1980). En la adsorción física el adsorbato se acumula sobre la superficie del adsorbente, debido a que la magnitud de las fuerzas de atracción entre la superficie y las moléculas del adsorbato son lo suficientemente grandes como para hacer que este último se deposite sobre el adsorbente (Treybal, 1955/1980). Esta acumulación no implica que se lleve

a cabo una reacción química, o que las moléculas del soluto se solubilizan, esto a su vez permite que el fenómeno pueda ser revertido, y que el adsorbente pueda ser recuperado, para que luego pueda volver a ser utilizado (Treybal, 1955/1980). Por otro lado, en la adsorción química si se produce una reacción química entre la superficie adsorbente y las moléculas que son adsorbidas, lo cual podría alterar químicamente al adsorbato (Treybal, 1955/1980).

Según Treybal (1955/1980), la capacidad que tiene un sólido para adsorber ciertas moléculas depende de las características químicas del sólido, de la manera en que este fue fabricado, de su capacidad para desorber, y de la relación que exista entre su peso y su área superficial. Treybal también explica que los adsorbentes suelen utilizarse en forma granular, utilizando sólidos con diámetros de entre 12 mm y 50 μ m.

A nivel industrial se suele utilizar como adsorbentes materiales como la silica gel, la alumina activada, arcillas activadas, materiales carbonizados y carbones activado (LeVan et al., 1997; Treybal, 1955/1980).

Cuando se pone en contacto una solución líquida con un adsorbente en fase sólida, no se puede medir de forma directa la adsorbancia total, en ese caso se mide la adsorbancia aparente, determinando el cambio en la concentración del soluto en un volumen determinado de solución (Treybal, 1955/1980).

Las isothermas de adsorción son gráficas que representan el equilibrio del proceso, en ellas se representa la concentración al equilibrio del soluto en el líquido en función del peso del soluto aparentemente adsorbido dividido entre el peso del adsorbente (Treybal, 1955/1980). La información representada en estas gráficas permite evaluar la relación entre un adsorbente y un soluto en específico, además permiten determinar si se está llevando a cabo una quimisorción o una fisisorción (Levine, 1978/2014). Algunos modelos comúnmente utilizados son las isothermas de Freundlich y Langmuir (Treybal, 1955/1980; Levine, 1978/2014).

Experimentalmente, para graficar isothermas, se suele trabajar con soluciones con distintas concentraciones del soluto en cuestión, que se ponen en contacto con el adsorbente, para luego evaluar el cambio en la concentración del soluto (Levine, 1978/2014). Es importante

hacer notar que este trabajo de investigación no tuvo como objetivo dibujar las curvas de adsorción de los materiales utilizados en el experimento, sin embargo, futuros trabajos de investigación podrían llevarse a cabo para evaluar las características físicas y químicas del carbón obtenido a partir del residuo del café percolado, evaluando su idoneidad como material adsorbente en una diversidad de escenarios.

6.7 Adsorción como tratamiento de aguas residuales:

La adsorción puede ser utilizada para remover contaminantes de aguas residuales, especialmente corrientes contaminadas que provienen procesos industriales, en donde es necesario remover pesticidas, metales pesados, compuestos orgánicos e inorgánicos (Ong, 2018). El carbón activado suele utilizarse como adsorbente en el tratamiento de aguas residuales; este compuesto se puede adquirir en dos tipos de presentaciones: carbón activado granular (0.42 a 2.38 mm de diámetro) y carbón activado pulverizado (con diámetros de aproximadamente 44 μ m) (Ong, 2018).

Cuando la adsorción se emplea en un tren de tratamiento de aguas residuales, se antecede a esta tecnología una remoción de sólidos y una filtración, esto podría evitar problemas de saturación y maximizar el contacto entre el adsorbato y las moléculas que deben ser removidas (Ong, 2018).

La capacidad del carbón activado para adsorber ciertos compuestos puede explicarse con la descripción de los grupos funcionales que se encuentran en su superficie, en el caso del carbón activado granular, se sabe que posee grupos OH- y COO- (Crittenden et al., 2005, como se cita en Ong, 2008). La presencia del grupo funcional hidróxilo implicaría que el carbón activado es capaz de atrapar moléculas de compuestos ácidos, neutralizándolas.

6.8 Determinación de Acidez de fenolftaleína:

La concentración de ácidos débiles en agua puede ser evaluada si la muestra se titula con hidróxido de sodio, utilizando como indicador fenolftaleína; en este caso los ácidos débiles se neutralizarán cuando se alcance un potencial de hidrógeno de aproximadamente 8.3 unidades (Sawyer et al., 1960/2001). La acidez de fenolftaleína se reporta como mg/L de carbonato de calcio (Sawyer et al., 1960/2001).

6.9 Determinación de la concentración de ácidos orgánicos y volátiles en agua:

Según indica Baird et al. (2017), en la publicación del manual “*Standard methods for the examination of water and wastewater*”, la concentración de ácidos orgánicos y ácidos volátiles en el agua puede ser expresada como la concentración de ácido acético. Según este manual, la presencia y concentración de ácidos orgánicos y volátiles en el agua puede ser evaluada por medio de tres metodologías distintas: separación cromatográfica, destilación y cromatografía de gas. De acuerdo con las descripciones proporcionadas en la publicación antes mencionada, para llevar a cabo la evaluación por medio de separación cromatográfica se requiere la adsorción de la muestra de agua en una columna de ácido silícico, que se pondrá en contacto con una solución de cloroformo y n-butanol; a continuación, la muestra se titulará con hidróxido de sodio disuelto en metanol.

Para llevar a cabo la determinación por medio de la destilación, según Baird et al. (2017), se aprovecha la diferencia en las presiones de saturación del agua y los ácidos volátiles. De acuerdo con estos autores, la muestra recuperada de la destilación luego se titulará con una solución de hidróxido de sodio, utilizando fenolftaleína como indicador.

Los dos procedimientos antes descritos proporcionan resultados que se reportan como concentración de ácido acético en el agua (Baird et al. 2017), pero el método cromatografía de gas permite identificar y cuantificar la presencia de otros ácidos orgánicos y volátiles en el agua. Para poder llevar a cabo este procedimiento, según lo indican Baird et al. será necesario utilizar un cromatógrafo de gases.

La implementación de las metodologías descritas en esta sección permitirían determinar la concentración de ácidos orgánicos en el agua miel, pero el enfoque de este experimento es evaluar los cambios en el potencial de hidrógeno del agua miel. Se puede considerar que el potencial de hidrógeno y la acidez con fenolftaleína son indicadores de la presencia de compuestos ácidos en las muestras de agua miel, por lo tanto, su determinación es suficiente para cumplir con los objetivos del proyecto planteado en este documento. Por otra parte, también es necesario tomar en cuenta que implementar cualquiera de las metodologías descritas para cuantificar ácidos orgánicos, implicaría la compra de equipo especializado e inclusive la capacitación de personal para llevar a cabo estas determinaciones.

6.10 Carbonización y carbón activado:

Marsh y Rodríguez-Reinoso (2006) explican que todos los tipos de carbón provienen de compuestos orgánicos que han sido sometidos a diversos procesos de carbonización, naturales o industriales. Estos autores también explican que la materia prima para obtener el carbón puede encontrarse en fase líquida, gaseosa o sólida; además de que se pueden obtener carbones a partir de cualquier especie de planta. Esto último, implica que es posible obtener carbón a partir de desechos como cáscaras o semillas. Sin embargo, Marsh y Rodríguez-Reinoso explican que no todos los materiales orgánicos de origen natural pueden ser utilizados para obtener carbón activado.

De acuerdo con Marsh y Rodríguez-Reinoso (2006) la porosidad de un carbón puede ser modificada a través de un proceso conocido como “activación”. Las diferentes metodologías que se utilizan para activar a los materiales carbonizados tienen como consecuencia la formación de poros de distintos tamaños, lo cual afecta la capacidad de adsorber del material. Marsh y Rodríguez-Reinoso clasifican los procesos de activación en dos ramas: la activación física y la activación química.

Durante la activación física, el material carbonizado debe ser expuesto a dióxido de carbono o vapor de agua, en un rango de temperatura de 800 a 900°C, con ello se logrará gasificar algunos átomos de carbono del material (Marsh y Rodríguez-Reinoso, 2006). Para realizar la activación química, el material carbonizado se impregna con cloruro de zinc, ácido fosfórico o hidróxido de potasio, y se expone a una atmósfera de nitrógeno a una temperatura en específico, que puede encontrarse en el rango de 300°C a 800°C (Marsh y Rodríguez-Reinoso, 2006).

7 Estado del arte

Los países productores de café se han dedicado a realizar trabajos de investigación con el objetivo de beneficiar a esta industria en distintos aspectos. Por un lado, se llevan a cabo investigaciones con el fin de aumentar la calidad del producto final que llega al consumidor de café, en tanto que también se evalúan procesos que puedan minimizar los problemas ambientales causados por los residuos generados por esta industria.. Esto implica desarrollar nuevos métodos para tratar las aguas residuales, e inclusive evaluar el reúso de materiales como el residuo que se genera a partir de la percolación del café. Según indican Woldeesenbet et al. (2015), dados los altos niveles de contaminación que provocan los desechos de la industria del café, se han desarrollado investigaciones para tratar estos residuos, o para utilizarlos como fuentes de materias primas para procesar alimentos, y obtener productos como vinagre, biogas, cafeína, compost, etc.

El método húmedo para el procesamiento de granos de café, conocido como “beneficiado húmedo” se caracteriza por generar aguas residuales con altas cargas orgánicas y niveles altos de acidez (Hariprasad y Dayananda, 2013). Se han desarrollado numerosas investigaciones, para buscar alternativas en el tratamiento de este tipo de agua residual, Ijanu et al. (2019) clasifican estos tratamientos en: tratamientos fisicoquímicos, y tratamientos biológicos. En su artículo de revisión, Ijanu et al. mencionan el uso de reactores de digestión aeróbica o anaeróbica, que según señalan los autores presentan la desventaja de necesitar mucho tiempo para lograr que las bacterias se adapten a las características del agua miel. En este mismo artículo, Ijanu et al. mencionan la utilización de carbón activado como alternativa para tratar el agua miel, método que según esta publicación consume mucha energía.

Devi et al. (2008) llevaron a cabo la investigación mencionada por Ijanu et al., el objetivo de esta investigación era reducir la demanda química y bioquímica de oxígeno en el agua miel, utilizando como adsorbente carbón activado comercial, y carbón activado preparado a partir de la cáscara del aguacate. Según Devi et al., ambos materiales son capaces de reducir la demanda química y bioquímica de oxígeno del agua miel, pero la efectividad del proceso depende de distintos factores: la velocidad de agitación del agua residual, el potencial de hidrógeno, el tiempo de contacto entre el agua y el adsorbente, la demanda química y bioquímica de oxígeno inicial del agua, y el tamaño

de la partícula del adsorbente utilizado. De acuerdo con Devi et al. como resultado de su experimento se obtuvo agua residual que podría ser utilizada en riego, o que podría desecharse a un cuerpo receptor, sin presentar inconvenientes para dicho cuerpo de agua. Es importante destacar, que la investigación de Devi et al. se centró en el manejo de la DQO y en la DBO₅, y no en la modificación del potencial de hidrógeno del agua miel.

Otro ejemplo de utilización de carbón activado en el tratamiento del agua residual de la industria del café lo proporcionan Bolaños y Otero (2017), quienes utilizaron filtros construidos a partir de mezclas de arena, carbón activado y borra de café, en distintas proporciones. El objetivo de la investigación de Bolaños y Otero era evaluar el comportamiento de la DBO₅ y la DQO del agua miel luego de pasar por los filtros mencionados. Como resultado observaron una disminución en los valores de la DBO₅ y la DQO y un aumento en el potencial de hidrógeno del agua miel.

La investigación reportada por Garaycochea Mendoza del Solar (2020) muestra la comparación del efecto de distintos tipos de carbón vegetal en el tratamiento de agua residual de la industria del café. Garaycochea Mendoza del Solar utilizó carbón vegetal obtenido a partir de cáscara de pacay, cáscara de arroz y cáscara de café, concluyendo que solamente el carbón vegetal de la cáscara de pacay provoca un cambio significativo en la DQO del agua residual, reportando también un aumento en su potencial de hidrógeno.

Martínez et al. (2021) utilizaron piedra pómez con una biopelícula de *Saccharomyces cerevisiae* y biocarbón como empaque en biofiltros con el objetivo de evaluar el efecto de este tratamiento sobre la carga orgánica del agua miel. Estos investigadores evaluaron la inferencia de factores como la presencia o ausencia del biocarbón y el tiempo de maduración de la biopelícula, sus resultados les permitieron concluir que se podía llegar a obtener un 100% de remoción de la carga orgánica del agua residual si se utilizaba un biofiltro cuya biopelícula había madurado por 48 horas y que contenía biocarbón en su estructura. Los resultados de Martínez et al. también mostraron un aumento en el potencial de hidrógeno del agua miel luego de haber sido sometida a tratamiento planteado por los investigadores.

Si bien, se han realizado diversas investigaciones con el objetivo de reducir la carga orgánica del agua miel, también se han realizado investigaciones centradas en reducir la acidez o aumentar el potencial de hidrógeno de este tipo de agua residual. Por ejemplo, Herrera y Peña (2017) utilizaron reactores anaeróbicos con la finalidad de aumentar el potencial de hidrógeno del agua miel, el tratamiento logró aumentar el valor de este parámetro, pero no fue posible llevar el potencial de hidrógeno del agua miel a las condiciones requeridas en el Reglamento de las descargas y reúso de aguas residuales y de la disposición de lodos (2006) para el reúso, o a las condiciones recomendadas por la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos en el documento publicado por Bastian y Murray (2012). Alas y Moreno (2013), evaluaron el uso de lechos de roca caliza, a nivel laboratorio, para aumentar el potencial de hidrógeno del agua miel, determinando que su metodología es efectiva para aumentar la magnitud de este parámetro en el agua residual de la industria del café. La magnitud del cambio provocado en el potencial de hidrógeno dependerá, según Alas y Moreno, de la carga hidráulica aplicada sobre el lecho de roca caliza.

Cerrato (2013), evaluó la neutralización del potencial de hidrógeno del aguamiel, implementando tres tratamientos: el primero utilizando hidróxido de calcio, el segundo usando bicarbonato de sodio, y el tercero mezclando hidróxido de calcio junto con bicarbonato de sodio. En su investigación Cerrato concluye que una dosis de 2.50 g/L de bicarbonato de sodio puede llevar al potencial de hidrógeno del agua miel a una magnitud promedio de 6.23 unidades, manteniendo del nivel del potencial de hidrógeno estable durante 24 horas. En el caso del uso del hidróxido de calcio, Cerrato determinó que este compuesto eleva de forma brusca el potencial de hidrógeno del agua miel, pero el valor de este parámetro no permanece estable luego del tratamiento. Por otra parte, Cerrato determinó que al mezclar una dosis de 1.50 g/L de hidróxido de sodio, con 1.00 g/L de bicarbonato de sodio, el potencial de hidrógeno del agua puede alcanzar una magnitud de 7.75 unidades, en este caso se determinó que este parámetro permanecerá estable durante 24 horas luego de la aplicación del tratamiento mencionado.

También se han desarrollado investigaciones para evaluar la posibilidad de utilizar la fitorremediación en el tratamiento de aguas mieles. Said et al. (2020) construyeron humedales utilizando *Phragmites karka* y *Eichhornia crassipes* con el objetivo de remover la carga orgánica

arrastrada por el agua residual de la industria de café. El tratamiento propuesto por Said et al. fue capaz de disminuir la demanda química de oxígeno del agua residual hasta en un 95%, remover el 94% de los sólidos suspendidos y remover el 79% del color. Carrero y Tapia (2019) utilizaron fitorremediación para aumentar el potencial de hidrógeno del agua miel, implementando un tratamiento con *Eichhornia crassipes M* (jacinto de agua). Según reportan Carrero y Tapia el tratamiento con jacinto de agua puede elevar el potencial de hidrógeno del agua miel a niveles que pueden ser considerados neutros.

La literatura reporta la utilización de microorganismos en el tratamiento del agua residual de la industria del café. Por ejemplo, Pires et al. (2021) condujeron una investigación en donde utilizaron una comunidad microbiana para inocular muestras de agua residual de la industria del café, como resultado obtuvieron una reducción en la DQO y DBO₅, así como en la concentración de fósforo y nitrógeno, y un aumento en el potencial de hidrógeno de las muestras.

Por su parte Ancy et al. (2021) reportan la utilización de una lectina aislada de la semilla de *Ricinus communis* en el tratamiento de agua miel, obteniendo como resultado reducción en el color del agua residual, reducción en la presencia de sólidos totales disueltos, reducción en la DQO y un aumento en el potencial de hidrógeno.

Como se mencionó en un principio, actualmente existe interés por evaluar el tratamiento o la reutilización de los residuos producidos por la industria de café. Hardgrove y Livesley (2016), evaluaron las consecuencias de aplicar residuos de café molido percolado en los suelos que se utilizan para agricultura; como consecuencia del tratamiento observaron un bajo crecimiento en las plantas que habían sido sembradas en este suelo.

Los residuos de café molido percolado también han sido utilizados para obtener carbón activado. Ching et al. (2011) evaluaron las condiciones para producir carbón activado a partir de los residuos de café percolado utilizando ácido sulfúrico en una activación química. El carbón activado obtenido Ching et al. fue utilizado para remover hierro y ortofosfato de lixiviados de vertederos. De acuerdo con Giraldo y Moreno-Piraján (2012), se puede sintetizar carbón activado a partir de

los residuos de café percolado, utilizando $ZnCl_2$ y KOH para llevar a cabo la carbonización en un ambiente con presencia de nitrógeno, y luego activando el material en presencia de CO_2 . Según Giraldo y Moreno-Pijarán, el carbón activado sintetizado de la manera antes descrita es adecuado para remover Zinc y Mercurio de soluciones acuosas. Jutakradsada et al. (2016) obtuvieron carbón activado a partir de residuos de café molido percolado, impregnando este residuo con 15% de $ZnCl_2$ por 24 horas y sometiéndolo a una carbonización a $500^\circ C$. A partir de este proceso Jutakradsada et al. produjeron carbón activado con un área superficial específica que, según estos autores, hace que este material sea adecuado para su uso en aplicaciones para el acondicionamiento de agua potable, e inclusive el tratamiento de agua residual. Rosson et al. (2020) también produjeron carbón activado a partir del residuo de la percolación del café, comparando sus propiedades con las del carbón activado que se vende a nivel comercial. Para producir estas muestras de carbón activado Rosson et al. trataron los residuos de café percolado con KOH y luego realizaron la pirolisis del material a altas temperaturas. Al comparar la capacidad de adsorción del nuevo material activado con la de carbones activados manejados comercialmente, llegaron a la conclusión de que el material proveniente del café mostraba capacidades de adsorción similares al ser utilizado en la remoción colorantes orgánicos y compuestos fenólicos.

Es necesario resaltar que los residuos generados por la industria del café, no son los únicos materiales que han sido utilizados para producir carbón activado o adsorbentes a bajo costo. De acuerdo con la investigación de Pehlivan et al. (2011), es posible utilizar el carbón de la madera de roble como adsorbente para remover iones de $Cr(VI)$ de soluciones acuosas, en rangos de potencial de hidrógeno específico. Pehlivan et al. no activaron el material carbonizado, lo cual implica que el material no activado también puede ser utilizado como adsorbente. Otro ejemplo del uso de adsorbentes de bajo costo, es la utilización de carbón obtenido a partir de bambú, Nitayaphat (2014) creó un adsorbente mezclando quitosán con carbón de bambú. Nitayaphat indica que, en las condiciones adecuadas, el adsorbente antes mencionado podría llegar a remover hasta el 98.4% de colorante Rojo 152 de soluciones acuosas. Por su parte, Hung et al. (2020) utilizaron cáscara de mani y cáscara de cebolla como adsorbentes para tratar agua contaminada con colorantes y café soluble. Los materiales utilizados como adsorbentes por Hung et al. fueron secados y pulverizados. En este caso no se menciona la necesidad de activar el material para luego

utilizarlo como adsorbente. Hung et al. midieron la adsorbancia de las muestras de agua residual, utilizando este parámetro como indicador de que los adsorbentes estaban removiendo color. Los resultados de Hung et al. muestran que ambos materiales pueden ser utilizados como adsorbentes para remover las partículas que aumentan el color del agua contaminada con colorante y con café soluble.

8 Objetivos

Objetivo general:

Analizar el efecto del carbón, utilizado como adsorbente, sobre el potencial de hidrógeno del agua miel.

Objetivos específicos:

1. Evaluar el efecto sobre el potencial de hidrógeno del agua miel si se utiliza carbón activado como adsorbente, analizando la incidencia del tiempo de contacto.
2. Evaluar el efecto sobre el potencial de hidrógeno del agua miel si se utiliza como adsorbente carbón, proveniente del residuo sólido de la percolación del café. Determinando el efecto del tiempo de contacto.

9 Hipótesis

- Al poner al agua residual de la industria del café en contacto con carbón activado, este material aumentará el potencial de hidrógeno y reducirá la acidez a la fenolftaleína del agua residual.
- El carbón proveniente del residuo de la percolación del café molido aumentará el potencial de hidrógeno y reducirá la acidez a la fenolftaleína del agua residual de la industria del café, si está se pone en contacto con el material mencionado.
- El tiempo de contacto entre el carbón activado y el agua residual de la industria de café, tiene un efecto significativo en el cambio provocado en el potencial de hidrógeno y en la acidez a la fenolftaleína de este tipo de agua residual.
- El tiempo de contacto entre el carbón proveniente del residuo de la percolación del café molido, tiene un efecto significativo en el cambio provocado en el potencial de hidrógeno y en la acidez a la fenolftaleína de este tipo de agua residual.
- El carbón activado y el carbón proveniente del residuo de la percolación del café molido tienen el mismo efecto sobre el cambio en el potencial de hidrógeno y la acidez a la fenolftaleína, si estos materiales se utilizan como adsorbentes en el tratamiento del agua residual de la industria del café.

10 Materiales y métodos (enfoque, métodos, recolección de información, técnicas e instrumentos, procesamiento y análisis de la información)

10.1 Enfoque de la investigación

Este proyecto de investigación tiene un enfoque cuantitativo, pues su objetivo es establecer si el carbón puede ser utilizado como adsorbente para remover sustancias ácidas del agua miel, y con ello elevar el potencial de hidrógeno de este tipo de agua residual.

Para poder evaluar el cumplimiento del objetivo planteado se midió la acidez a la fenolftaleína del agua miel y su potencial de hidrógeno, antes y después de ser tratada con carbón.

10.2 Método

En el caso del objetivo específico número 1, se trabajó con dos variables respuesta: potencial de hidrógeno y acidez a la fenolftaleína. Se midió el potencial de hidrógeno debido a que es el parámetro que utiliza el Reglamento de las descargas y reúso de aguas residuales y de la disposición de lodos (2006) para evaluar la acidez del agua residual. Para medir el potencial de hidrógeno se utilizó un potenciómetro. La acidez a la fenolftaleína se midió como complemento al potencial de hidrógeno, para detectar variaciones en la concentración de ácidos orgánicos, como el ácido acético. Para determinar la acidez a la fenolftaleína se lleva a cabo una titulación con hidróxido de sodio y fenolftaleína.

Se descartó medir de forma directa la presencia de ácidos orgánicos y volátiles, ya que los métodos descritos en el libro *“Standard methods for the examination of water and wastewater”* requieren la utilización de equipo de laboratorio con el que no se cuenta, y cuyo precio supera el presupuesto que se puede solicitar a la Dirección General de Investigación de la Universidad de San Carlos. Además, para aplicar los métodos para la medición directa de ácidos orgánicos y volátiles se necesita de personal capacitado que tenga experiencia en dichas mediciones, y no se cuenta con personal que posea dichas características.

Para desarrollar el objetivo específico 2 fue necesario procesar el residuo de la percolación del café para obtener carbón a partir de él. Para carbonizar este material, se utilizó de un horno de secado y un horno tipo mufla.

Se descartó procesar el residuo de la percolación de café para obtener carbón activado, pues la activación de este material requeriría de hornos tipo mufla con atmósfera controlada y acceso a más reactivos, lo cual elevaría los costos de esta investigación. Además, es necesario tomar en cuenta, que, de comprobarse la hipótesis planteada, es decir determinar que el carbón puede ser utilizado para aumentar el potencial de hidrógeno del agua miel, el proceso de activar el carbón sería difícil de reproducir en las instalaciones en las que normalmente operan los beneficios de café del país.

Para evaluar los resultados del objetivo específico 2, se trabajó con las mismas variables respuesta que se mencionaron en el caso del objetivo específico 1: potencial de hidrógeno y acidez a la fenolftaleína.

Los experimentos se llevaron a cabo en las instalaciones del Laboratorio de Físicoquímica de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos, y en el laboratorio de la compañía Mediciones Ambientales. Además, debido al cierre de las instalaciones de la Universidad de San Carlos, parte del procedimiento experimental se llevó a cabo en la zona 6 de la Ciudad de Guatemala.

10.3 Recolección de información

En esta investigación se trabajó con agua residual de la industria del café, específicamente agua residual que proviene del beneficiado húmedo. Las muestras de agua miel fueron recolectadas por personal de la Asociación Nacional del Café, en el beneficio húmedo Nuevo Sendero en San Rosa, en el periodo de febrero a diciembre del 2022. El experimento requirió que el agua miel fuera sometida a un tratamiento con dos materiales distintos: carbón

activado (comprado a un distribuidor de productos químicos), y carbón obtenido del residuo de la percolación de café (que fue proporcionado por la Asociación Nacional del café).

La implementación de la metodología experimental propuesta se llevó cabo en el laboratorio de Fisicoquímica, de la Escuela de Ingeniería Química, de la Universidad de San Carlos y en el laboratorio de la empresa Mediciones ambientales. Parte de la implementación experimental se llevó a cabo en la zona 6 de la ciudad de Guatemala.

Para recolectar el agua miel, se utilizó un muestreo aleatorio.

El experimento se diseñó de manera que se evaluaron tres factores: tiempo de contacto entre el agua residual y el material adsorbente, carbón y tipo de carbón. El factor tiempo de contacto contó con 6 niveles, es decir el agua miel se expuso al adsorbente durante 6 rangos de tiempo distintos (30, 60, 90, 120, 150 y 180 minutos). El factor denominado “carbón” permitió comparar el potencial de hidrógeno del agua miel antes y después de exponerse al adsorbente, lo cual constituye dos niveles para este factor. El factor tipo de carbón se evaluó con dos niveles: carbón activado y carbón proveniente del residuo de la percolación de café. Esto implica que se trabajó con 24 unidades experimentales. Por conveniencia se decidió trabajar con 6 repeticiones por unidad experimental, lo cual se traduce en 144 mediciones o ensayos.

La decisión de limitar las repeticiones a 6 réplicas por unidad experimental se debe a que este proyecto de investigación fue diseñado de manera que solamente una persona trabajó en él de manera directa, llevando a cabo los procesos experimentales y las actividades administrativas necesarias. Se debe tomar en cuenta que la persona que se encargó de estas actividades también tiene asignadas actividades de docencia con la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, por lo que no dedicó todo su tiempo de contratación a la ejecución de este proyecto (en el presupuesto presentado no se solicitó la contratación de personal, pues la persona que coordinó y ejecutó el proyecto tiene un tiempo de contratación de 8 horas al día, que se dividen en actividades de docencia e investigación para la Escuela de Ingeniería Química).

El diseño propuesto se utilizó para evaluar el efecto del adsorbente sobre el potencial de hidrógeno del agua miel, es decir que la variable respuesta en este caso fue el potencial de hidrógeno. De igual forma, se midió la acidez a la fenolftaleína de las muestras, lo cual permitió utilizar el mismo diseño para evaluar el efecto del adsorbente sobre esta otra variable.

10.4 Técnicas e instrumentos

En el caso del objetivo específico 1 se evaluó el efecto del carbón activado sobre el potencial de hidrógeno, midiendo esta variable en el agua miel antes y después de ser expuesta al material adsorbente en cuestión. Para medir el potencial de hidrógeno se utilizó un potenciómetro. Una comparación de medias apareadas permitió evaluar si hay diferencia significativa en el potencial de hidrógeno debido al tratamiento con el carbón activado. El agua miel fue expuesta al carbón activado durante distintos periodos de tiempo para poder evaluar el efecto del tiempo de contacto sobre esta variable. Se trabajó con periodos de 30, 60, 90 120, 150 y 180 minutos. A las mismas muestras a las que se les midió el potencial de hidrógeno, se les midió la concentración de acidez a la fenolftaleína, y se realizaron las mismas evaluaciones: comparación de concentración de este parámetro antes y después del tratamiento con carbón activado, y evaluación de la concentración en función del tiempo de contacto. Para determinar la concentración de acidez a la fenolftaleína se llevó a cabo una titulación con hidróxido de sodio, utilizando fenolftaleína como indicador.

Por otro lado, antes de llevar a cabo los procedimientos para evaluar al objetivo específico 2, fue necesario obtener material carbonizado a partir del residuo de la percolación de café. Para ello, el residuo de la percolación fue secado en un horno por 1.5 horas a 93.33°C, y luego fue carbonizarlo en una mufla a 300°C durante 30 minutos.

Una vez obtenido el material carbonizado de la percolación del café, este fue puesto en contacto con el agua miel, y se evaluó el efecto de este tratamiento sobre el potencial de hidrógeno. Los datos se analizaron, de nuevo, con una comparación de medias apareadas. En

esta ocasión, también se trabajó con distintos intervalos de tiempo (30, 60, 90, 120, 150 y 180 minutos). Al igual que en el caso descrito para el tratamiento con carbón activado, con el material carbonizado de la percolación también se evaluó el efecto que tiene su contacto sobre la acidez a la fenolftaleína del agua miel.

El efecto del tiempo de contacto, y el tipo de carbón utilizado en el tratamiento, fue evaluado utilizando un análisis de varianza multifactorial, en donde la variable respuesta fue el cambio en el potencial de hidrógeno. Este análisis estadístico se repitió, pero en esta ocasión se midió el efecto sobre el cambio en la concentración de acidez a la fenolftaleína.

Las evaluaciones estadísticas se realizaron en el software Infostat y los resultados se representaron en gráficas elaboradas con el software Excel.

10.5 Procesamiento y análisis de la información

Con el fin de evaluar si el carbón tiene efecto sobre el potencial de hidrógeno del agua miel, se midió este parámetro en el agua residual antes de ser puesta en contacto con el adsorbente, y luego del tratamiento se volvió a medir el potencial de hidrógeno. Una comparación de medias dependientes (comparación de medias apareadas) permitió evaluar si existe diferencia significativa entre el potencial de hidrógeno del agua antes y después de que fuera sometida al tratamiento con carbón. La misma evaluación estadística se realizó con los datos obtenidos al medir la acidez a la fenolftaleína en el agua miel antes y después de su tratamiento con carbón.

En el procedimiento experimental se utilizaron dos tipos de carbón: carbón activado y material carbonizado a partir de los residuos sólidos de la percolación del café molido. Además, también se evaluó el efecto del tiempo de contacto entre el carbón y el agua miel. El efecto de ambos factores, tipo de carbón y tiempo de contacto, sobre el cambio en el potencial de hidrógeno, fue evaluado por medio de un análisis de varianza multifactorial. El

mismo análisis estadístico se realizó para evaluar el efecto de los factores antes mencionados sobre el cambio en la acidez a la fenolftaleína.

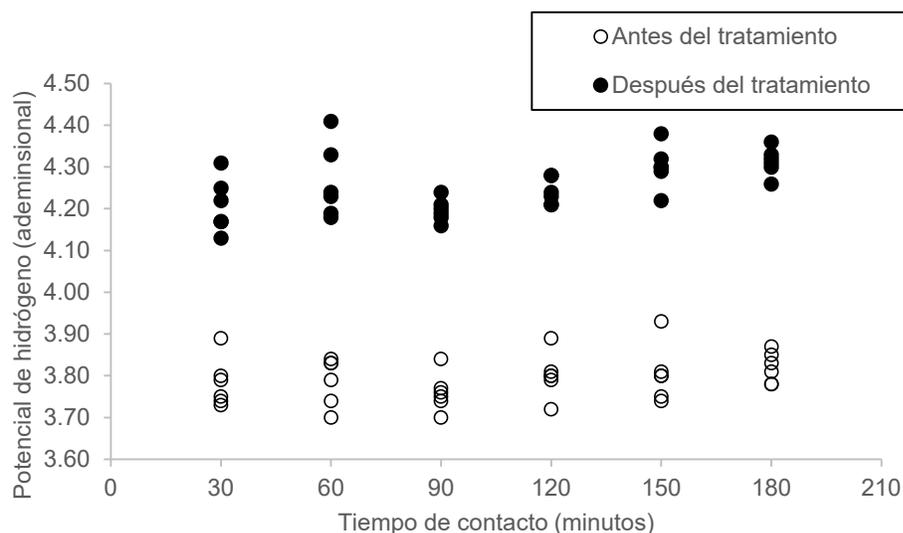
Los análisis estadísticos mencionados se realizaron con un nivel de significancia del 5%. Para procesar la información estadística se utilizó Infostat, y para hacer representaciones gráficas se utilizó Excel. Para trabajar con el software Infostat, se utilizó una licencia de estudiante (gratuita). En el caso de Microsoft Excel, se utilizó la licencia gratuita a la que la Facultad de Ingeniería ha dado acceso a sus catedráticos.

11 Resultados y discusión

11.1 Resultados

Figura 1

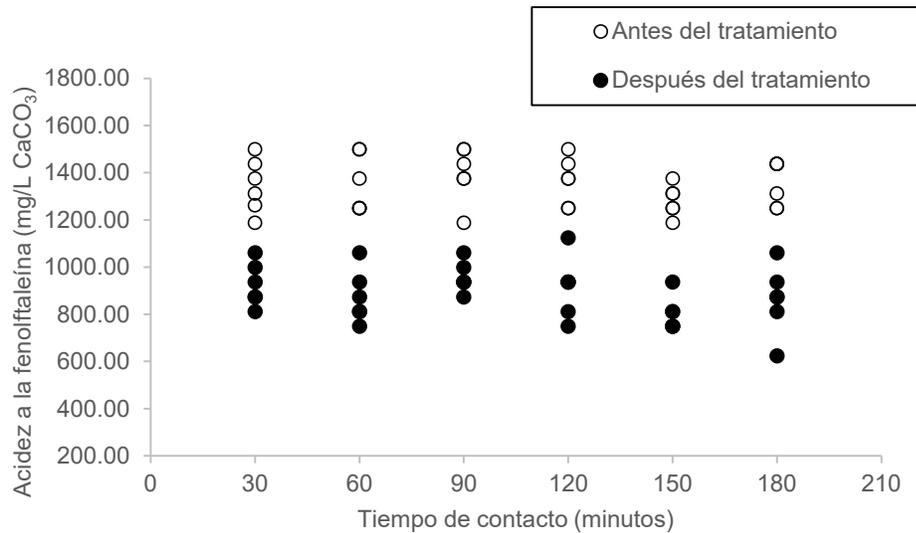
Potencial de hidrógeno del agua miel antes y después del tratamiento con carbón activado, en distintos intervalos de tiempo.



Nota. Los círculos blancos representan el potencial de hidrógeno de las muestras de agua miel antes de ser sometidas al tratamiento con carbón activado comercial, los círculos negros representan el potencial de hidrógeno de las muestras después de que fueran expuestas al carbón activado comercial. Las unidades experimentales están ordenadas según el intervalo de tiempo por el que la muestra estuvo en contacto con el carbón activado comercial.

Figura 2

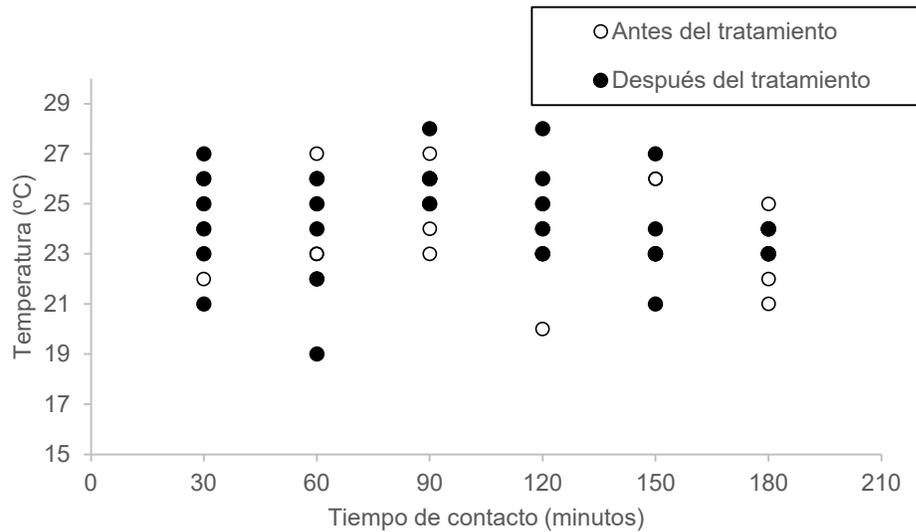
Acidez a la fenolftaleína del agua miel antes y después del tratamiento con carbón activado, en distintos intervalos de tiempo.



Nota. Los círculos blancos representan la acidez a la fenolftaleína de las muestras de agua miel antes de ser sometidas al tratamiento con carbón activado comercial, los círculos negros representan la acidez a la fenolftaleína de las muestras después de que fueran expuestas al carbón activado comercial. Las unidades experimentales están ordenadas según el intervalo de tiempo por el que la muestra estuvo en contacto con el carbón activado comercial. mg/L CaCO₃ = Miligramos de carbonato de calcio por litro.

Figura 3

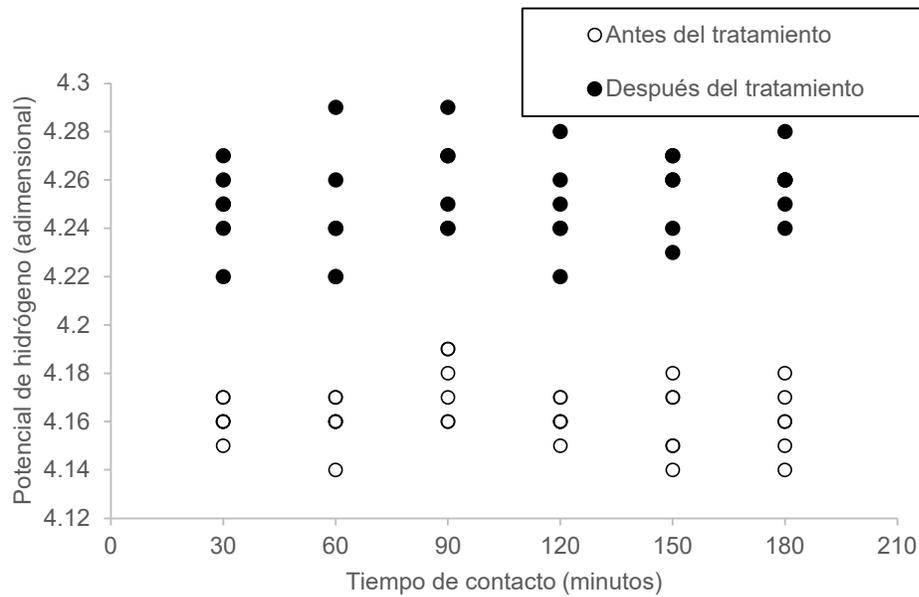
Temperatura de las muestras de agua miel antes y después del tratamiento con carbón activado, en distintos intervalos de tiempo.



Nota. Los círculos blancos representan la temperatura de las muestras de agua miel antes de ser sometidas al tratamiento con carbón activado comercial, los círculos negros representan la temperatura de las muestras después de que fueran expuestas al carbón activado comercial. Las unidades experimentales están ordenadas según el intervalo de tiempo por el que la muestra estuvo en contacto con el carbón activado comercial.

Figura 4

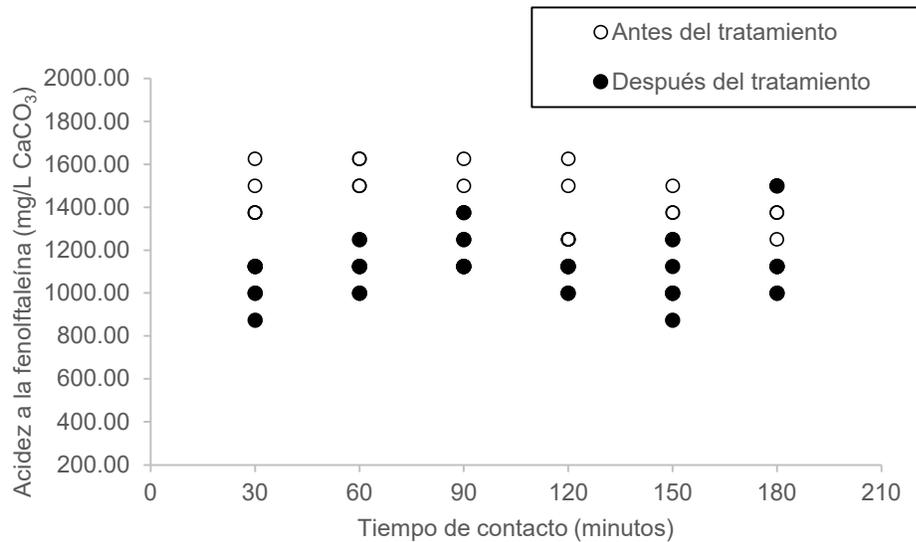
Potencial de hidrógeno del agua miel antes y después del tratamiento con carbón vegetal, en distintos intervalos de tiempo.



Nota. Los círculos blancos representan el potencial de hidrógeno de las muestras de agua miel antes de ser sometidas al tratamiento con carbón vegetal, los círculos negros representan el potencial de hidrógeno de las muestras después de que fueran expuestas al carbón vegetal. El carbón vegetal se obtuvo a partir de residuos de café percolado. Las unidades experimentales están ordenadas según el intervalo de tiempo por el que la muestra estuvo en contacto con el carbón activado comercial.

Figura 5

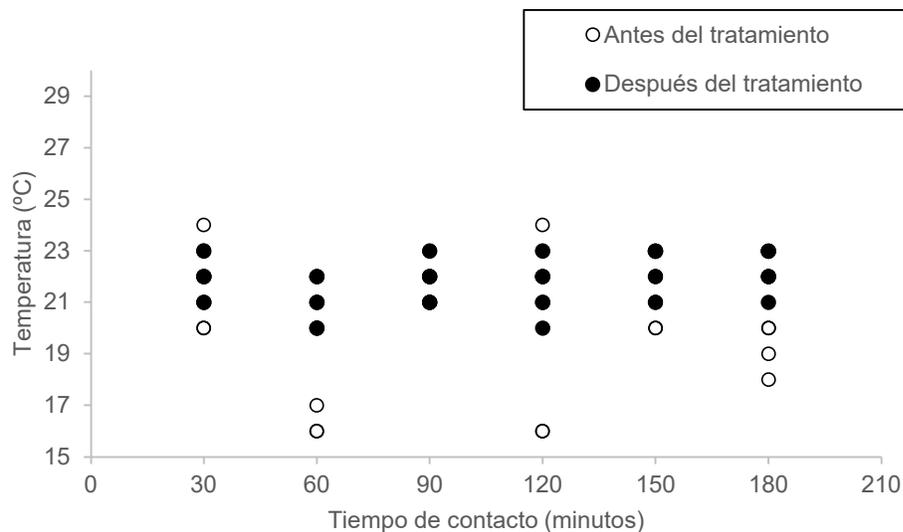
Acidez a la fenolftaleína del agua miel antes y después del tratamiento con carbón vegetal, en distintos intervalos de tiempo.



Nota. Los círculos blancos representan la acidez a la fenolftaleína de las muestras de agua miel antes de ser sometidas al tratamiento con carbón vegetal, los círculos negros representan la acidez a la fenolftaleína de las muestras después de que fueran expuestas al carbón vegetal. El carbón vegetal se obtuvo a partir de residuos de café percolado. Las unidades experimentales están ordenadas según el intervalo de tiempo por el que la muestra estuvo en contacto con el carbón activado comercial. mg/L CaCO₃ = Miligramos de carbonato de calcio por litro.

Figura 6

Temperatura de las muestras de agua miel antes y después del tratamiento con carbón vegetal, en distintos intervalos de tiempo.



Nota. Los círculos blancos representan la temperatura de las muestras de agua miel antes de ser sometidas al tratamiento con carbón vegetal, los círculos negros representan la temperatura de las muestras después de que fueran expuestas al carbón vegetal. El carbón vegetal se obtuvo a partir de residuos de café percolado. Las unidades experimentales están ordenadas según el intervalo de tiempo por el que la muestra estuvo en contacto con el carbón activado comercial.

11.2 Discusión de resultados

El objetivo de este trabajo de investigación es evaluar si el carbón puede ser utilizado como una alternativa en el tratamiento para elevar el potencial de hidrógeno del agua miel, reduciendo la presencia de compuestos ácidos en este tipo de agua residual.

Para esto se utilizaron dos tipos de carbón: carbón activado comercial y carbón vegetal obtenido a partir del residuo de la percolación del café. El carbón de tipo comercial fue comprado a una distribuidora de productos químicos. Para obtener el carbón vegetal, la

Asociación Nacional del Café proporcionó el residuo de la percolación de café proveniente de la finca Las Loma y Anexos, ubicada en Amatlán, cuyo perfil se categoriza como Fraijanes Plateau. Este material fue secado en un horno a 93.33°C por 1.5 horas, y luego fue carbonizado en una mufla a 300°C durante 30 minutos.

Se trabajó con muestras de agua miel provenientes del beneficio húmedo Nuevo Sendero (ubicado en Santa Rosa). Las muestras de agua miel fueron filtradas, utilizando papel filtro, para luego medir su potencial de hidrógeno y la acidez a la fenolftaleína antes de ser puestas en contacto con el carbón. Luego se tomaron muestras de 50 mililitros de agua miel y cada una de ellas fue puesta en contacto con 0.24 gramos de carbón activado comercial durante distintos intervalos de tiempo (30 minutos, 60 minutos, 90 minutos, 120 minutos, 150 minutos y 180 minutos). Una vez transcurrido el tiempo se utilizó papel filtro para separar el carbón activado del agua miel y poder medir el potencial de hidrógeno y la acidez a la fenolftaleína. El procedimiento se repitió empleando esta vez el carbón vegetal obtenido a partir del residuo de la percolación del café. Para medir el potencial de hidrógeno se utilizó un potenciómetro y para determinar la acidez a la fenolftaleína se realizó una titulación con una solución 0.5 M de hidróxido de sodio, utilizando fenolftaleína con indicador. La acidez a la fenolftaleína es una forma de medir la concentración de ácidos débiles en muestras de agua (Sawyer et al., 1960/2001), como el ácido acético.

Los datos obtenidos experimentalmente fueron analizados con pruebas estadísticas realizadas con un nivel de significancia del 5%.

El resultado de exponer el agua miel al carbón activado comercial se muestra en las figuras 1 y 2, presentando el comportamiento del potencial de hidrógeno y de la acidez a la fenolftaleína del agua miel antes y después del tratamiento. La figura 3 muestra el monitoreo de la temperatura de las muestras utilizadas en esta parte del experimento.

En la figura 1 es evidente que el potencial de hidrógeno del agua miel es menor a 4 unidades, pero el valor de este parámetro aumenta luego del tratamiento con carbón activado comercial. Lo anterior se complementa con el resultado de la figura 2, en donde se observa que la magnitud de la acidez a la fenolftaleína disminuye en el agua miel luego de que fuera expuesta al carbón activado. Los datos de las figuras 1 y 2 presentan un ajuste significativo

a distribución normal y que por lo tanto pueden ser procesados con métodos paramétricos para la evaluación de hipótesis. Se realizó un análisis de varianza, tomando como factor el tiempo de contacto entre el agua residual y el material adsorbente, y como covariable la temperatura de las muestras. El resultado de esta prueba indica que el tiempo de contacto tiene un efecto insignificante sobre el cambio en el potencial de hidrógeno de las muestras. En el caso de la temperatura, los resultados muestran que esta variable podría tener un efecto levemente significativo sobre el cambio en el potencial de hidrógeno. Al evaluar el efecto del tiempo de contacto y la temperatura sobre el cambio en la acidez a la fenolftaleína, el análisis de varianza muestra que estas variables tienen un efecto insignificante sobre este parámetro. Lo anterior implica que modificar el tiempo de contacto entre 30 minutos y 180 minutos no tiene un efecto significativo en la adsorción de compuestos ácidos en el carbón activado en contacto con agua miel. Una comparación de muestras apareadas permitió contrastar el valor del potencial de hidrógeno del agua miel antes y después de ser puesta en contacto con carbón activado comercial. El resultado de esta prueba permite inferir que el contacto con carbón activado probablemente causa un aumento en el potencial de hidrógeno; en el caso de la acidez, esta prueba indica que probablemente el carbón activado causa una disminución significativa en la magnitud de este parámetro. La disminución de la magnitud de la acidez a la fenolftaleína implica que el carbón activado adsorbió moléculas de compuestos ácidos en su superficie, provocando en consecuencia un aumento en el potencial de hidrógeno del agua miel, ya que la presencia del grupo hidroxilo en la superficie del carbón activado (Crittenden et al., 2005, como se cita en Ong, 2008) tendría como consecuencia la neutralización de estos compuestos ácidos. Sin embargo, en este caso el potencial de hidrógeno del agua miel no llega a alcanzar el rango de 6 a 9 unidades que establece el Reglamento de las descargas y reúso de aguas residuales y de la disposición de lodos (2006), y tampoco se encuentra en el rango de 6.5 a 8.4 unidades que recomiendan Bastian y Murray (2012) como apropiado para agua residual que será reutilizada en el riego de plantaciones.

El experimento se repitió utilizando carbón vegetal, que como se describió en párrafos anteriores, se obtuvo a partir de residuos de café percolado. En la figura 4 se puede observar que la exposición del agua miel a este tipo de carbón vegetal también causa un posible un

aumento en el potencial de hidrógeno de este tipo de agua residual. En este caso las pruebas estadísticas muestran que los datos correspondientes se ajustan a la distribución normal. El análisis de varianza permite concluir que el tiempo de contacto entre el agua miel y el carbón vegetal no tiene influencia significativa en el cambio de potencial de hidrógeno obtenido, si se trabaja en el rango de 30 minutos a 180 minutos. La temperatura tampoco tiene influencia sobre el cambio en el potencial de hidrógeno. La comparación de medias corrobora que la exposición del agua miel al carbón vegetal provoca un aumento significativo en el potencial de hidrógeno, sin embargo, al igual que como sucede en el caso de la exposición del agua miel al carbón activado, el cambio provocado no es lo suficientemente grande como para llevar el potencial de hidrógeno del agua miel a un rango que pueda ser considerado como neutro o apropiado para la irrigación. La comparación de medias realizadas muestra que el contacto del agua miel con carbón vegetal probablemente causa una disminución significativa en la acidez a la fenolftaleína del agua miel, así como sucede con el carbón activado comercial. Al evaluar la normalidad de las diferencias pareadas en el caso de la acidez a la fenolftaleína de las muestras antes y después del contacto con el carbón vegetal, se observó una leve desviación de la normalidad al utilizar el método de Shapiro-Wilks, por lo que se evaluaron los datos utilizando la prueba de Wilcoxon, esta última prueba permitió confirmar que en efecto la diferencia provocada por el carbón vegetal en la acidez de las muestras es significativa. Sin embargo, modificar el tiempo de contacto no tuvo un efecto significativo sobre el cambio en la acidez, y la temperatura tampoco tuvo un efecto sobre este parámetro. En el caso del carbón vegetal, el hecho de que se observe una disminución en la acidez a la fenolftaleína y un aumento en el potencial de hidrógeno en el agua miel luego de ser expuesta a este tipo de material adsorbente, podría indicar que el carbón vegetal también tiene en su superficie el grupo hidroxilo que menciona Crittenden et al. (2005) (como se cita en Ong, 2008).

Comparaciones de muestras independientes permiten contrastar el cambio obtenido en los parámetros al tratar el agua miel con carbón activado comercial y con el carbón vegetal del residuo de la percolación del café. Estas pruebas permiten inferir que el carbón activado comercial probablemente produce un mayor aumento en el potencial de hidrógeno del agua miel si se compara con el cambio provocado por el carbón vegetal; en el caso de la acidez a

la fenolftaleína el carbón activado también está asociado a una mayor disminución en este parámetro. En estos casos la diferencia de los datos entre poblaciones no se ajustó a la distribución normal, por lo que fue necesario realizar la comparación entre los resultados obtenidos con el carbón activado y el carbón vegetal con la prueba de Mann–Whitney–Wilcoxon, el resultado de esta prueba corroboró lo concluido a partir de las comparaciones de muestras independientes con la distribución T.

Los resultados anteriores muestran que, aunque el carbón activado y el carbón vegetal provocan un aumento en el potencial de hidrógeno del agua miel, el potencial de hidrógeno no alcanza los valores requeridos para que este tipo de agua residual sea reutilizada en el riego. Futuras investigaciones podrían evaluar el efecto de ambos tipos de carbón sobre el agua miel si estos tipos de adsorbentes son expuestos al agua residual por periodos de tiempo más largos que los utilizados en esta investigación. También, dado el hecho de que el carbón vegetal obtenido a partir del residuo del café percolado, logró adsorber sustancias ácidas, se hace evidente que futuras investigaciones podrían ser conducidas para evaluar las propiedades químicas y físicas de este adsorbente, inclusive evaluando las condiciones a las que es producido el material.

12 Referencias

- Aguiar, L. L., Andrade-Vieira, L. F., & de Oliveira David, J. A. (2016). Evaluation of the toxic potential of coffee wastewater on seeds, roots and meristematic cells of *Lactuca sativa* L. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 133, 366–372. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2016.07.019>
- Akiça Bahri, V. L. (Ed.). (2004). *Water reuse for irrigation: agriculture, landscapes, and turf grass* [Reuso de agua para irrigación: agricultura, paisaje, y césped]. CRC Press.
- Alas, B. I., & Moreno, M. A. (2013). Evaluación de la eficiencia de modelos experimentales de lecho de roca caliza y laguna facultativa, a escala laboratorio, para el ajuste del potencial de hidrógeno y la remoción de carga contaminante de las aguas mieles de un beneficio húmedo tecnificado de café [Tesis de maestría, Escuela regional de Ingeniería Sanitaria]. Repositorio Biblioteca Universidad de San Carlos de Guatemala. http://biblioteca.usac.edu.gt/tesis/08/08_0438_MT.pdf
- Ancy, A. J., Vasanthy, M., Thamarai selvi, C., Ravindran, B., Chung, W. J., & Chang, S. W. (2021). Treatment of coffee cherry pulping wastewater by using lectin protein isolated from *Ricinus communis* L. seed. *Journal of Water Process Engineering*, 39. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2020.101742>
- Asociación Nacional del Café. (2011). *Green book* [Libro verde]. Asociación Nacional del Café. <https://www.dmcgt.com/wp-content/uploads/2019/08/Green-book-Guatemalan-Coffee.pdf>
- Baird, R. B., Eaton, A. D., & Rice, E. W. (Eds.) (2017). *Standard Methods for the examination of water and wastewater* [Métodos estandarizados para la evaluación de agua potable y agua residual]. American Public Health Association. American Water Works Association. Water Environment Federation.
- Bastian, R., & Murray, D. (2012). *2012 Guidelines for water reuse*. Agencia para la protección ambiental de Estados Unidos. <https://nepis.epa.gov/Adobe/PDF/P100FS7K.pdf>

- Bolaños, J. L., & Otero Muñoz, J. (2017). Determinación de la eficiencia de la borra de café utilizada como material adsorbente en el proceso de remoción de DQO y SST, para el tratamiento de mucilago residual [Tesis de licenciatura, Corporación universitaria autónoma del Cauca, Facultad de ciencias ambientales y desarrollo sostenible]. Repositorio Uniautónoma del Cauca. <https://repositorio.uniautonoma.edu.co/handle/123456789/11>
- Carrero, N. L., & Tapia, J. H. (2019). Incremento del Potencial de Iones Hidrógeno (Ph) del Agua Miel de Coffea sp. Empleando Fitorremediación con Eichhornia crassipes M. “Jacinto de Agua” para Atenuar su Nivel de Contaminación. [Tesis licenciatura, Universidad Nacional de Jaén]. Repositorio Universidad de Jaén. http://repositorio.unj.edu.pe/bitstream/UNJ/131/1/Carrero_FNL_Tapia_AJH.pdf
- Cerrato, C. (2013). Neutralización del potencial de hidrógeno del agua miel de un beneficio húmedo tecnificado de café. [Tesis de maestría, Escuela regional de Ingeniería Sanitaria]. Repositorio Biblioteca Universidad de San Carlos de Guatemala. http://biblioteca.usac.edu.gt/tesis/08/08_0439_MT.pdf
- Ching, S. L., Yusoff, M. S., Aziz, H. A., & Umar, M. (2011). Influence of impregnation ratio on coffee ground activated carbon as landfill leachate adsorbent for removal of total iron and orthophosphate. *Desalination*, 279(1), 225–234. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2011.06.011>
- Devi, R., Singh, V., & Kumar, A. (2008). COD and BOD reduction from coffee processing wastewater using Avacado peel carbon. *Bioresource Technology*, 99(6), 1853–1860. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2007.03.039>
- Dobrowolski, J., O' Neill, M., Duriancik, L., & Throwe, J. (2008). *Opportunities and challenges in agricultural water reuse*. U.S Department of agriculture research, education, and economics mission area, The watereuse association, and Washington state University.

https://arch.umd.edu/sites/default/files/docs/publications/opps_challenges_agwater_reuse.pdf

Garaycochea Mendoza del Solar, A. (2020). Remoción de la demanda química de oxígeno del agua residual del procesamiento del café mediante bioadsorbentes derivados de residuos agrícolas [Tesis de licenciatura, Universidad científica del sur]. Repositorio Universidad científica del sur. [https://repositorio.cientifica.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12805/1071/TL-](https://repositorio.cientifica.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12805/1071/TL-Garaycochea%20A.pdf?sequence=1)

[Garaycochea%20A.pdf?sequence=1](https://repositorio.cientifica.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12805/1071/TL-Garaycochea%20A.pdf?sequence=1)

Giraldo, L., & Moreno-Piraján, J. C. (2012). Synthesis of Activated Carbon Mesoporous from Coffee Waste and Its Application in Adsorption Zinc and Mercury Ions from Aqueous Solution. *E-Journal of Chemistry*, 9, 120763. <https://doi.org/10.1155/2012/120763>

Guía ambiental para el sector café de Guatemala, acuerdo ministerial número 314-2018 (2018). <https://www.anacafe.org/uploads/file/98fba1edb64349b3bae9989dc72f7f89/Guia-Ambiental-Anacafe-2019.pdf>

Hardgrove, S. J., & Livesley, S. J. (2016). Applying spent coffee grounds directly to urban agriculture soils greatly reduces plant growth. *Urban Forestry & Urban Greening*, 18, 1–8. <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2016.02.015>

Hariprasad, N. V., & Dayananda, H. S. (2013). Eco-engineered treatment of coffee processing wastewater. *International Journal of Engineering Research and Science & Technology*, 2 (3), 97-101.

<https://citeseerx.ist.psu.edu/document?repid=rep1&type=pdf&doi=738f9cf7893296bc4b7f2626fb4e32286d1460d0>

Herrera, A. R., & Montes, A.G. (2017). Diseño, construcción y evaluación de un reactor anaeróbico para el tratamiento de las aguamiel de un beneficio húmedo de café. [Tesis de maestría, Escuela regional de Ingeniería Sanitaria]. Repositorio Biblioteca Universidad de San Carlos de Guatemala. http://biblioteca.usac.edu.gt/tesis/08/08_0552_MT.pdf

- Hung, Y.-T., Pamula, A., & Paul, H. (2020). Treatment of Combined Acid Black 48 and Coffee Wastewater by Low-Cost Adsorbents. *Environmental Research, Engineering and Management*, 76(3), 47–61. <https://doi.org/10.5755/j01.erem.76.3.25338>
- Ijanu, E. M., Kamaruddin, M. A., & Norashiddin, F. A. (2019). Coffee processing wastewater treatment: a critical review on current treatment technologies with a proposed alternative. *Applied Water Science*, 10, NA.
- Jutakridsada, P., Prajaksud, C., Kuboonya-Aruk, L., Theerakulpisut, S., & Kamwilaisak, K. (2016). Adsorption characteristics of activated carbon prepared from spent ground coffee. *Clean Technologies and Environmental Policy*, 18(3), 639–645. <https://doi.org/10.1007/s10098-015-1083-x>
- LeVan, D., Carta, G., & Yon, C.M. (1997). Adsorption and ionic exchange [Adsorción e intercambio iónico]. En R. H. Perry, D.W. Green & J. O. Maloney (Eds.), *Perry's chemical engineers' handbook*: Sección 16. Adsorption and ionic exchange (7ma ed., pp.4-10). McGraw-Hill.
- Levine, I. N. (2014). *Principios de fisicoquímica* (N. G. Cázarez. Trad; 6ta ed.). McGraw-Hill. (Trabajo original publicado en 1978)
- Marsh, H., & Rodríguez-Reinoso, F. (2006). *Activated Carbon* [Carbón activado]. Elsevier.
- Martínez, I. H., Santiago, C. A., Hernández, L., & Aguilar, F. A. A. (2021). Tratamiento de agua residual de beneficio de café mediante un biofiltro de bajo costo. *Revista Ingeniantes*, 1(1), 60-66. <https://citt.itsm.edu.mx/ingeniantes/articulos/ingeniantes8no1vol1/8%20Biofitro%20cafe.pdf>
- Mihelcic, J. R., & Zimmerman, J. B. (2012). *Ingeniería ambiental: fundamentos, sustentabilidad* ,

diseño. Alfaomega.

Nitayaphat, W. (2014). Utilization of chitosan/bamboo charcoal composite as reactive dye adsorbent. *Chiang Mai J. Sci*, 41(1), 174–183.

Ong, S. K. (2018). Adsorption and ion exchange [Adsorción e intercambio iónico]. En M. Kutz (Ed.) *Handbook of environmental engineering: sección 12. Wastewater engineering* (1 era ed., pp.365-366). Wiley.

Pehlivan, E., Kahraman, H., & Pehlivan, E. (2011). Sorption equilibrium of Cr(VI) ions on oak wood charcoal (Carbo Ligni) and charcoal ash as low-cost adsorbents. *Fuel Processing Technology*, 92(1), 65–70. <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2010.08.021>

Pires, J. F., Viana, D. C., Braga, R. A., Schwan, R. F., & Silva, C. F. (2021). Protocol to select efficient microorganisms to treat coffee wastewater. *Journal of Environmental Management*, 278, 111541. <https://doi.org/10.1016/J.JENVMAN.2020.111541>

Reglamento de las descargas y reuso de aguas residuales y de la disposición de lodos, Acuerdo gubernativo No. 236-2006 (2006). http://www.infom.gob.gt/archivos/Docs-Pdf/Anexo-Legal/ANEXO_1_Reglamento-descargas-de-aguas-residuales-AG236-2006.pdf

Rosson, E., Garbo, F., Marangoni, G., Bertani, R., Lavagnolo, M. C., Moretti, E., Talon, A., Mozzon, M., & Sgarbossa, P. (2020). Activated carbon from spent coffee grounds: A good competitor of commercial carbons for water decontamination. *Applied Sciences (Switzerland)*, 10(16). <https://doi.org/10.3390/app10165598>

Said, N. S. M., Abdullah, S. R. S., Ismail, N., Izzati, Hasan, H. A., & Othman, A. R. (2020). Phytoremediation of real coffee industry effluent through a continuous two-stage constructed wetland system. *Environmental Technology & Innovation*, 17, 100502. <https://doi.org/10.1016/j.eti.2019.100502>

- Sawyer, C. N., McCarty, P. L., & Parkin, G. F. (2001). *Química para ingeniería ambiental*. (L. Arteaga, Trad.; 4ta ed.). McGraw-Hill. (Trabajo original publicado en 1960)
- Torres-Valenzuela, L. S., Villarrea, A. S., Ramírez, A. A., & Serna-Jiménez, J. A. (2019). Caracterización fisicoquímica y microbiológica de aguas mieles del beneficio del café. *Revista Ion*, 32(2), 59–66. <https://doi.org/10.18273/revion.v32n2-2019006>
- Treybal, R.T. (1980). *Operaciones de transferencia de masa* (A. M. Rodríguez, Trad.; 2da edición.). McGraw- Hill. (Trabajo original publicado en 1955)
- Von Enden, J. C., Calvert, K. C., Sanh, K., Hoa, H., Tri, Q., Vietnam, S. R., & Consulting, C. (2002). Review of coffee waste water characteristics and approaches to treatment. *PPP Project, Improvement of Coffee Quality and Sustainability of Coffee Production in Vietnam. German Technical Cooperation Agency (GTZ)*, 1–10.
- Woldesenbet, A.G., Woldeyes B., & Chandravanshi B.S. (2015). Wet coffee processing waste management practice in Ethiopia. *Asian Journal of Science and Technology*, 6(05), 1467–1471.

13 Apéndice

Tabla 1

Potencial de hidrógeno del agua miel antes y después del tratamiento con carbón activado, en distintos intervalos de tiempo.

Tiempo de contacto (min)	pH		Cambio de pH
	Antes del tratamiento	Después del tratamiento	
30	3.75	4.13	0.38
30	3.74	4.17	0.43
30	3.80	4.17	0.37
30	3.79	4.25	0.46
30	3.73	4.22	0.49
30	3.89	4.31	0.42
60	3.83	4.41	0.58
60	3.74	4.19	0.45
60	3.84	4.33	0.49
60	3.79	4.18	0.39
60	3.70	4.23	0.53
60	3.83	4.24	0.41
90	3.76	4.20	0.44
90	3.74	4.21	0.47
90	3.77	4.19	0.42
90	3.75	4.24	0.49
90	3.70	4.16	0.46
90	3.84	4.18	0.34
120	3.80	4.24	0.44
120	3.81	4.28	0.47

Informe final proyecto de investigación 2022

Dirección General de Investigación –DIGI-

120	3.79	4.21	0.42
120	3.72	4.23	0.51
120	3.80	4.28	0.48
120	3.89	4.21	0.32
150	3.80	4.30	0.50
150	3.75	4.22	0.47
150	3.93	4.32	0.39
150	3.80	4.30	0.50
150	3.74	4.29	0.55
150	3.81	4.38	0.57
180	3.81	4.36	0.55
180	3.87	4.32	0.45
180	3.78	4.31	0.53
180	3.83	4.30	0.47
180	3.85	4.26	0.41
180	3.78	4.33	0.55
Promedio	3.79	4.25	0.46

Tabla 2

Acidez a la fenolftaleína del agua miel antes y después del tratamiento con carbón activado, en distintos intervalos de tiempo.

Tiempo de contacto (min)	Volumen NaOH (mL)		Acidez a la fenolftaleína (mg/L CaCO ₃)		Cambio de acidez a la fenolftaleína (mg/L CaCO ₃)
	Antes del tratamiento	Después del tratamiento	Antes del tratamiento	Después del tratamiento	
30	1.20	0.85	1500.00	1062.50	437.50
30	0.95	0.70	1187.50	875.00	312.50
30	1.15	0.80	1437.50	1000.00	437.50
30	1.01	0.65	1262.50	812.50	450.00
30	1.10	0.75	1375.00	937.50	437.50
30	1.05	0.70	1312.50	875.00	437.50
60	1.00	0.60	1250.00	750.00	500.00
60	1.20	0.65	1500.00	812.50	687.50
60	1.00	0.75	1250.00	937.50	312.50
60	1.10	0.85	1375.00	1062.50	312.50
60	1.20	0.65	1500.00	812.50	687.50
60	1.00	0.70	1250.00	875.00	375.00
90	1.20	0.85	1500.00	1062.50	437.50
90	1.10	0.70	1375.00	875.00	500.00
90	1.15	0.75	1437.50	937.50	500.00
90	0.95	0.75	1187.50	937.50	250.00
90	1.20	0.75	1500.00	937.50	562.50
90	1.10	0.80	1375.00	1000.00	375.00

Informe final proyecto de investigación 2022

Dirección General de Investigación –DIGI-

120	1.10	0.75	1375.00	937.50	437.50
120	1.00	0.65	1250.00	812.50	437.50
120	1.10	0.90	1375.00	1125.00	250.00
120	1.20	0.75	1500.00	937.50	562.50
120	1.00	0.60	1250.00	750.00	500.00
120	1.15	0.75	1437.50	937.50	500.00
150	1.00	0.60	1250.00	750.00	500.00
150	1.05	0.75	1312.50	937.50	375.00
150	1.00	0.65	1250.00	812.50	437.50
150	1.10	0.65	1375.00	812.50	562.50
150	1.05	0.60	1312.50	750.00	562.50
150	0.95	0.60	1187.50	750.00	437.50
180	1.15	0.50	1437.50	625.00	812.50
180	1.15	0.70	1437.50	875.00	562.50
180	1.00	0.65	1250.00	812.50	437.50
180	1.15	0.75	1437.50	937.50	500.00
180	1.05	0.85	1312.50	1062.50	250.00
180	1.00	0.70	1250.00	875.00	375.00
Promedio	1.08	0.71	1349.31	890.63	458.68

Tabla 3

Temperatura de las muestras de agua miel antes y después del tratamiento con carbón activado, en distintos intervalos de tiempo.

Tiempo de contacto (min)	Temperatura (°C)	
	Antes del tratamiento	Después del tratamiento
30	26	27
30	26	26
30	24	24
30	23	23
30	25	25
30	22	21
60	22	19
60	25	26
60	22	22
60	23	25
60	27	26
60	23	24
90	27	26
90	26	26
90	23	25
90	26	25
90	26	28
90	24	26
120	24	24
120	23	23
120	24	25
120	25	28
120	23	23
120	20	26

150	23	23
150	26	27
150	23	23
150	23	23
150	26	24
150	23	21
180	22	23
180	21	23
180	23	23
180	24	24
180	23	24
180	25	24

Tabla 4

Análisis de la varianza para la diferencia del potencial de hidrógeno del agua miel tratada con carbón activado comercial en función del tiempo (covariable: temperatura)

Variable	N	R ²	R ² Aj	CV
Δ pH	36	0.57398	0.46747	10.0004

Tabla 5

Cuadro de análisis de la varianza para la diferencia del potencial de hidrógeno del agua miel tratada con carbón activado comercial en función del tiempo (covariable: temperatura)

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor	Coef
Modelo	0.08022	7	0.01146	5.38915	0.0005	
t (min)	0.02508	5	0.00502	2.35862	0.0661	
T ₀ (°C)	0.04269	1	0.04269	20.0746	0.0001	0.02939
T ₁ (°C)	0.04031	1	0.04031	18.9555	0.0002	-0.0249
Error	0.05954	28	0.00213			
Total	0.13976	35				

Tabla 6

Prueba de Shapiro-Wilks para la diferencia del potencial de hidrógeno del agua miel tratada con carbón activado comercial.

Variable	n	Media	D.E.	W*	p (Unilateral D)
RE ΔpH	36	0.00769	1.00519	0.98033	0.9437

Tabla 7

Prueba de Tukey para la diferencia del potencial de hidrógeno del agua miel tratada con carbón activado comercial en función del tiempo

t (min)	Medias	n	E.E.		
30	0.41345	6	0.01901	A	
90	0.43719	6	0.02055	A	B
60	0.46645	6	0.01905	A	B
150	0.47418	6	0.01947	A	B
120	0.47517	6	0.02015	A	B
180	0.50023	6	0.01942		B

Nota: Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0.05$)

Tabla 8

Prueba T (muestras pareadas) para la diferencia del potencial de hidrógeno del agua miel tratada con carbón activado comercial

Obs (1)	Obs (2)	N	Media (dif)	Media (1)	Media (2)	DE (dif)	LI (95%)	LE (95%)	T	Bilateral
pH1	pH2	36	0.46	4.25	3.79	0.06	0.44	0.48	43.78	<0.0001

Tabla 9

Prueba de Shapiro-Wilks (modificada) para la diferencia del potencial de hidrógeno del agua miel tratada con carbón activado comercial.

Variable	n	Media	D.E.	W*	p(Unilateral D)
Δ pH	36	0.46111	0.06319	0.96728	0.7215

Tabla 10

Análisis de la varianza para la diferencia de la acidez a la fenolftaleína del agua miel tratada con carbón activado comercial en función del tiempo (covariable: temperatura)

Variable	N	R ²	R ² Aj	CV
ΔAcidez (mg/L)	36	0.05764	0	28.9266

Tabla 11

Cuadro de análisis de la varianza para la diferencia de la acidez a la fenolftaleína del agua miel tratada con carbón activado comercial en función del tiempo (covariable: temperatura)

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor	Coef
Modelo	30151.9	7	4307.42	0.24468	0.9698	
t (min)	28364.2	5	5672.85	0.32224	0.8953	
T ₀ (°C)	792.647	1	792.647	0.04503	0.8335	4.00456
T ₁ (°C)	5817.57	1	5817.57	0.33047	0.57	-9.4516
Error	492917	28	17604.2			
Total	523069	35				

Tabla 12

Prueba de Shapiro-Wilks para la diferencia de la acidez a la fenolftaleína del agua miel tratada con carbón activado comercial.

Variable	n	Media	D.E.	W*	p (Unilateral D)
RE ΔAcidez/(mg/L)	36	-0.0074	1.00738	0.96185	0.5974

Tabla 13

Prueba de Tukey para la diferencia de la acidez a la fenolftaleína del agua miel tratada con carbón activado comercial en función del tiempo

t (min)	Medias	n	E.E.	
180	-493.53	6	55.8846	A
150	-487.11	6	56.0168	A
60	-484.2	6	54.8165	A
120	-439.92	6	57.9895	A
90	-427.16	6	59.1306	A
30	-420.16	6	54.6955	A

Nota: Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0.05$)

Tabla 14

Prueba T (muestras pareadas) para la diferencia de la acidez a la fenolftaleína del agua miel tratada con carbón activado comercial

Obs(1)	Obs(2)	N	Media(dif)	Media(1)	Media(2)	DE(dif)	LI(95%)	LS(95%)	T	Bilateral
Acidez 0	Acidez 1	36	458.68	1349.31	890.63	122.25	417.32	500.04	22.51	<0.0001

Tabla 15

Prueba de Shapiro-Wilks (modificada) para la diferencia de la acidez a la fenolftaleína del agua miel tratada con carbón activado comercial.

Variable	n	Media	D.E.	W*	p (Unilateral D)
Δ Acidez	36	-458.68	122.25	0.94	0.1398

Tabla 16

Potencial de hidrógeno del agua miel antes y después del tratamiento con carbón vegetal, en distintos intervalos de tiempo.

Tiempo de contacto (min)	pH		Cambio de pH
	Antes del tratamiento	Después del tratamiento	
30	4.15	4.24	0.09
30	4.16	4.25	0.09
30	4.16	4.22	0.06
30	4.17	4.25	0.08
30	4.16	4.27	0.11
30	4.17	4.26	0.09
60	4.16	4.24	0.08
60	4.16	4.24	0.08
60	4.17	4.22	0.05
60	4.17	4.29	0.12
60	4.14	4.22	0.08
60	4.16	4.26	0.1
90	4.18	4.27	0.09
90	4.19	4.27	0.08
90	4.16	4.24	0.08
90	4.19	4.24	0.05
90	4.16	4.29	0.13
90	4.17	4.25	0.08
120	4.16	4.26	0.1
120	4.17	4.22	0.05
120	4.17	4.28	0.11
120	4.15	4.24	0.09
120	4.16	4.24	0.08

Informe final proyecto de investigación 2022

Dirección General de Investigación –DIGI-

120	4.16	4.25	0.09
150	4.15	4.26	0.11
150	4.14	4.24	0.1
150	4.15	4.23	0.08
150	4.18	4.26	0.08
150	4.17	4.27	0.1
150	4.17	4.27	0.1
180	4.14	4.24	0.1
180	4.15	4.26	0.11
180	4.18	4.28	0.1
180	4.16	4.26	0.1
180	4.16	4.25	0.09
180	4.17	4.26	0.09
Promedio	4.16	4.25	0.09

Tabla 17

Acidez a la fenolftaleína del agua miel antes y después del tratamiento con carbón vegetal, en distintos intervalos de tiempo.

Tiempo de contacto (min)	Volumen NaOH (mL)		Acidez a la fenolftaleína (mg/L CaCO ₃)		Cambio de acidez a la fenolftaleína (mg/L CaCO ₃)
	Antes del tratamiento	Después del tratamiento	Antes del tratamiento	Después del tratamiento	
30	1.20	0.90	1500.00	1125.00	375.00
30	1.10	0.90	1375.00	1125.00	250.00
30	0.90	0.70	1125.00	875.00	250.00
30	1.10	0.80	1375.00	1000.00	375.00
30	1.10	0.80	1375.00	1000.00	375.00
30	1.30	0.90	1625.00	1125.00	500.00
60	1.30	1.00	1625.00	1250.00	375.00
60	1.00	0.80	1250.00	1000.00	250.00
60	0.90	0.80	1125.00	1000.00	125.00
60	1.30	0.90	1625.00	1125.00	500.00
60	1.20	0.90	1500.00	1125.00	375.00
60	1.20	0.90	1500.00	1125.00	375.00
90	1.10	1.00	1375.00	1250.00	125.00
90	1.00	0.90	1250.00	1125.00	125.00
90	1.30	0.90	1625.00	1125.00	500.00
90	1.00	0.90	1250.00	1125.00	125.00
90	1.10	0.90	1375.00	1125.00	250.00
90	1.20	1.10	1500.00	1375.00	125.00

Informe final proyecto de investigación 2022

Dirección General de Investigación –DIGI-

120	1.00	0.90	1250.00	1125.00	125.00
120	1.20	0.90	1500.00	1125.00	375.00
120	1.00	0.80	1250.00	1000.00	250.00
120	1.00	0.80	1250.00	1000.00	250.00
120	1.00	0.90	1250.00	1125.00	125.00
120	1.30	0.90	1625.00	1125.00	500.00
150	1.10	0.80	1375.00	1000.00	375.00
150	1.10	0.70	1375.00	875.00	500.00
150	1.20	0.80	1500.00	1000.00	500.00
150	1.00	0.90	1250.00	1125.00	125.00
150	1.70	1.00	2125.00	1250.00	875.00
150	1.00	0.80	1250.00	1000.00	250.00
180	1.20	0.90	1500.00	1125.00	375.00
180	1.20	0.80	1500.00	1000.00	500.00
180	1.10	0.90	1375.00	1125.00	250.00
180	1.00	0.80	1250.00	1000.00	250.00
180	1.10	0.90	1375.00	1125.00	250.00
180	1.20	1.20	1500.00	1500.00	0.00
Promedio	1.13	0.88	1413.19	1100.69	312.50

Tabla 18

Temperatura de las muestras de agua miel antes y después del tratamiento con carbón vegetal, en distintos intervalos de tiempo

Tiempo de contacto (min)	Temperatura (°C)	
	Antes del tratamiento	Después del tratamiento
30	23	22
30	23	22
30	20	22
30	20	21
30	22	21
30	24	23
60	17	21
60	22	21
60	20	22
60	16	20
60	16	20
60	21	22
90	21	22
90	22	22
90	21	22
90	21	21
90	23	23
90	21	21
120	16	22
120	24	23
120	22	22
120	23	21
120	16	20
120	22	21

150	21	21
150	22	22
150	22	23
150	21	23
150	20	23
150	20	23
180	20	23
180	19	22
180	22	21
180	20	22
180	22	23
180	18	23

Tabla 19

Análisis de la varianza para la diferencia del potencial de hidrógeno del agua miel tratada con carbón vegetal función del tiempo (covariable: temperatura)

Variable	N	R ²	R ² Aj	CV
ΔpH	36	0.09967	0	21.5819

Tabla 20

Cuadro de análisis de la varianza para la diferencia del potencial de hidrógeno del agua miel tratada con carbón vegetal en función del tiempo (covariable: temperatura)

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor	Coef
Modelo	0.00116	7	0.00017	0.44281	0.8665	
t (min)	0.00108	5	0.00022	0.58225	0.7133	
T ₀ (°C)	2.50E-06	1	2.50E-06	0.00679	0.9349	-0.0002
T ₁ (°C)	0.00013	1	0.00013	0.33755	0.5659	-0.0026
Error	0.01043	28	0.00037			
Total	0.01159	35				

Tabla 21

Prueba de Shapiro-Wilks para la diferencia del potencial de hidrógeno del agua miel tratada con carbón vegetal.

Variable	n	Media	D.E.	W*	p (Unilateral D)
RE ΔpH	36	0.0002	1.0207	0.961	0.5802

Tabla 22

Prueba de Tukey para la diferencia del potencial de hidrógeno del agua miel tratada con carbón vegetal en función del tiempo

t (min)	Medias	n	E.E.	
60	0.08255	6	0.00886	A
90	0.08513	6	0.00803	A
120	0.08578	6	0.00801	A
30	0.08687	6	0.00826	A
150	0.09678	6	0.00836	A
180	0.09956	6	0.00832	A

Nota: Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0.05$)

Tabla 23

Prueba T (muestras pareadas) para la diferencia del potencial de hidrógeno del agua miel tratada con carbón activado vegetal.

Obs(1)	Obs(2)	N	Media(dif)	Media(1)	Media(2)	DE(dif)	LI(95%)	LS(95%)	T	Bilateral
pH1	pH0	36	0.0894	4.2525	4.1631	0.0182	0.0833	0.0956	29.4929	<0.0001

Tabla 24

Prueba de Shapiro-Wilks (modificada) para la diferencia del potencial de hidrógeno del agua miel tratada con carbón vegetal.

Variable	n	Media	D.E.	W*	p (Unilateral D)
Δ pH	36	0.0894	0.0182	0.9227	0.0577

Tabla 25

Análisis de la varianza para la diferencia de la acidez a la fenoltaleína del agua miel tratada con carbón vegetal en función del tiempo (covariable: temperatura)

Variable	N	R ²	R ² Aj	CV
Δ Acidez(mg/L)	36	0.2047	0.0059	54.3504

Tabla 26

Cuadro de análisis de la varianza para la diferencia de la acidez a la fenolftaleína del agua miel tratada con carbón vegetal en función del tiempo (covariable: temperatura)

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor	Coef
Modelo	207901	7	29700.2	1.0296	0.433	
t (min)	197220	5	39443.9	1.3673	0.2664	
T ₀ (°C)	15173	1	15173	0.526	0.4743	-11.549
T ₁ (°C)	1842.75	1	1842.75	0.0639	0.8023	9.9024
Error	807724	28	28847.3			
Total	1015625	35				

Tabla 27

Prueba de Shapiro-Wilks para la diferencia de la acidez a la fenolftaleína del agua miel tratada con carbón vegetal.

Variable	n	Media	D.E.	W*	p (Unilateral D)
RE ΔAcidez(mg/L)	36	0.0067	1.0055	0.964	0.6481

Tabla 28

Prueba de Tukey para la diferencia de la acidez a la fenolftaleína del agua miel tratada con carbón vegetal en función del tiempo.

t (min)	Medias	n	E.E.	
150	-439.93	6	73.5424	A
60	-347.86	6	77.9565	A
30	-338.45	6	72.6478	A
180	-281.24	6	73.2167	A
120	-269.14	6	70.4363	A
90	-198.39	6	70.6819	A

Nota: Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0.05$)

Tabla 29

Prueba T (muestras pareadas) para la diferencia de la acidez a la fenolftaleína del agua miel tratada con carbón vegetal

Obs(1)	Obs(2)	N	Media(dif)	Media(1)	Media (2)	DE (dif)	LI (95%)	LS(95%)	T	Bilateral
Acidez 1 (mg/L)	Acidez 2 (mg/L)	36	-312.5	1100.694	1413.194	170.346	-370.137	-254.86	-11.007	<0.0001

Tabla 30

Prueba de Shapiro-Wilks (modificada) para la diferencia de la acidez a la fenolftaleína del agua miel tratada con carbón vegetal.

Variable	n	Media	D.E.	W*	p (Unilateral D)
Δacidez (mg/L)	36	-312.5	170.35	0.91	0.0243

Tabla 31

Prueba de Wilcoxon (muestras pareadas) para la diferencia de la acidez a la fenolftaleína del agua miel tratada con carbón vegetal.

Obs(1)	Obs(2)	N	Suma (R+)	E(R+)	Var(R+)	media(dif)	DE(dif)	Z	p (2 colas)
Acidez 1 (mg/L)	Acidez 2 (mg/L)	36	0	333	3998.38	-312.5	170.346	-5.2663	<0.0001

Tabla 32

Prueba T para muestras independientes comparando el cambio del potencial de hidrógeno provocado por el carbón activado comercial y el carbón vegetal

	Grupo 1 Carbón activado	Grupo 2 Carbón vegetal
n	36	36
Media	0.4611	0.0894
Varianza	0.004	0.0003
Media(1)-Media(2)	0.3717	
LI (95)	0.3495	
LS (95)	0.3938	
pHomVar	<0.0001	
T	33.9122	
gl	41	
p-Valor	<0.0001	

Tabla 33

Prueba de Mann–Whitney–Wilcoxon comparando el cambio del potencial de hidrógeno provocado por el carbón activado comercial y el carbón vegetal

		Estadístico	p	Diferencia de medias	Intervalo de Confianza al 95%	
					Inferior	Superior
Δ pH	U de Mann-Whitney	0	< .001	0.37	0.35	0.39

Tabla 34

Prueba de Shapiro-Wilks para la comparación de la diferencia provocada en el potencial de hidrógeno del agua miel por el carbón activado y el carbón vegetal.

	W	P
Δ pH	0.95	0.006

Tabla 35

Prueba T para muestras independientes comparando el cambio de la acidez a la fenolftaleína provocado por el carbón activado comercial y el carbón vegetal

	Grupo 1	Grupo 2
	Carbón activado	Carbón vegetal
n	36	36
Media	-458.6806	-312.5
Varianza	14944.8165	29017.8571
Media(1)-Media(2)	-146.1806	
LI (95)	-215.8771	
LS (95)	-76.484	
pHomVar	0.0534	
T	-4.1831	
gl	70	
p-valor	0.0001	

Tabla 36

Prueba de Mann–Whitney–Wilcoxon comparando el cambio de la acidez a la fenolftaleína provocado por el carbón activado comercial y el carbón vegetal

		Estadístico	p	Diferencia de medias	Intervalo de Confianza al 95%	
					Inferior	Superior
Δ Acidez	U de Mann-Whitney	295	< .001	-187	-188	-62.5

Tabla 37

Prueba de Shapiro-Wilks para la comparación de la diferencia provocada la acidez a la fenolftaleína del agua miel por el carbón activado y el carbón vegetal.

	W	p
Δ Acidez	0.946	0.004

Figura 7

Recolección de muestras de agua miel en el beneficio húmedo Nuevo Sendero en Santa Rosa, Guatemala.



Nota: Fotografía tomada por Ing. Roberto Soto (ANACAFÉ).

Figura 8

Recolección de muestras de agua miel en el beneficio húmedo Nuevo Sendero, en Santa Rosa, Guatemala.



Nota: Fotografía tomada por Ing. Roberto Soto (ANACAFÉ).

Figura 9

Refrigeración de muestras de agua miel en laboratorio.



Figura 10

Filtración de muestras de agua miel



Figura 11

Comparación de agua miel con agua miel filtrada.



Figura 12

Muestra de agua miel en contacto con carbón activado comercial

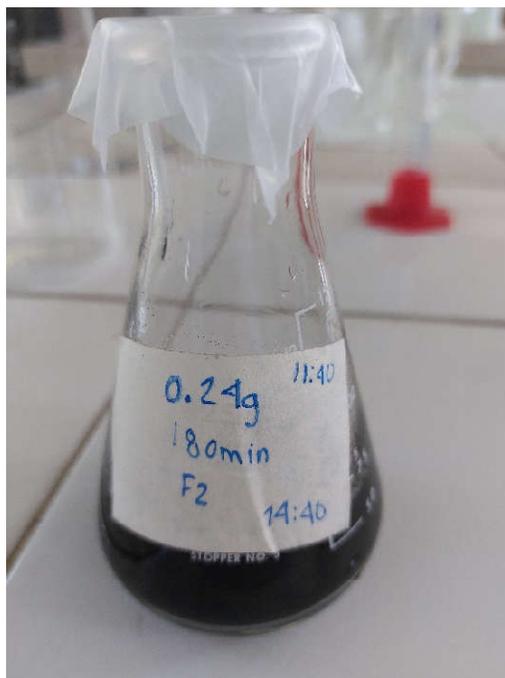


Figura 13

Comparación de muestras de agua miel en distintas etapas del tratamiento.



Nota: El primer recipiente del lado izquierdo contiene el agua residual sin ningún tratamiento, el segundo tratamiento contiene agua residual filtrada, el tercer recipiente contiene una muestra de agua miel mezclada con carbón activado comercial, el cuarto recipiente contiene una muestra de agua miel luego de pasar por el tratamiento con carbón activado comercial y ser filtrada para separarla del carbón activado.

Figura 14

Secado de muestras de residuo de café percolado



Figura 15

Muestra de residuo de café percolado luego del proceso de secado



Figura 16

Mufla utilizada para la carbonización de residuos de café percolado.



Figura 17

Residuo de café percolado seco antes de ser carbonizado en la mufla.



Figura 18

Carbonización de residuos de café percolado



Figura 19

Residuo de café percolado seco y carbonizado



Nota: El recipiente del lado izquierdo contiene el residuo de café percolado que ha sido secado. El recipiente del lado derecho contiene el residuo de café percolado que se ha carbonizado.

Figura 20

Muestra de agua miel en contacto con carbón vegetal

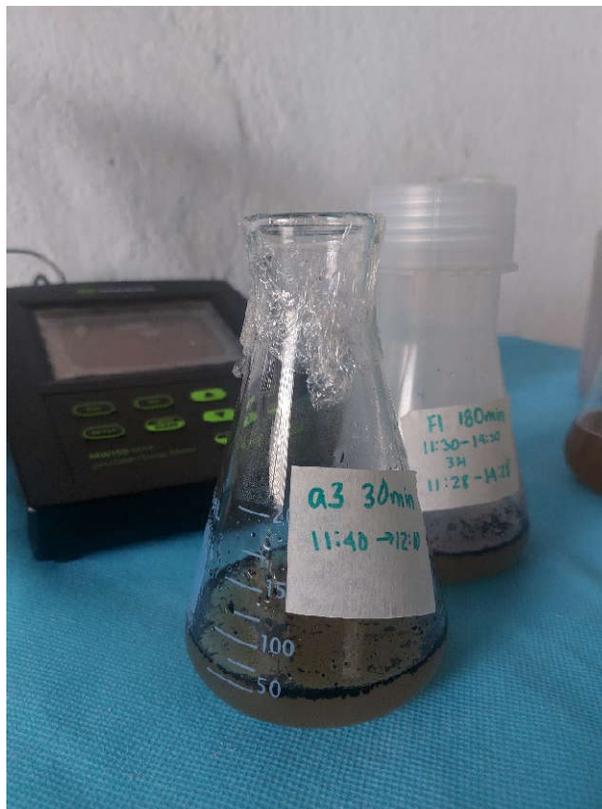


Figura 21

Medición de potencial de hidrógeno de muestra de agua miel tratada con carbón vegetal.

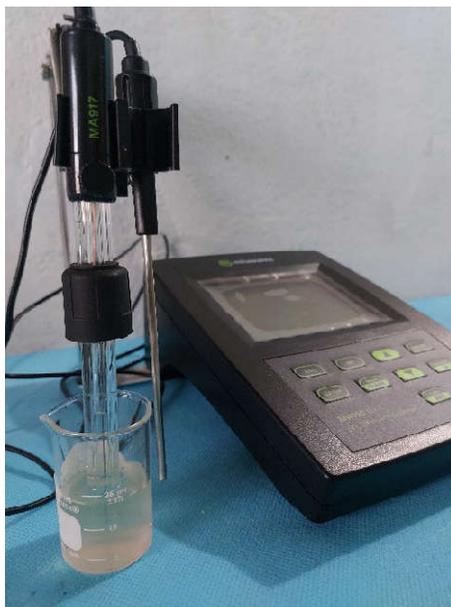


Figura 22

Muestra de agua miel titulada para determinar acidez a la fenolftaleína



Figura 23

*Conferencia para el XXVII Congreso Latinoamericano de Estudiantes de Ingeniería Química:
Tratamiento del agua residual de la industria del café.*



Figura 24

Entrevista radial: Agua residual de la industria del café tratamiento e investigación.



Nota: Entrevista realizada para Franja Radial de la Facultad de Ingeniería USAC.

Figura 25

Conferencia para el primer congreso de INDETEIQ: Uso de carbón activado para la elevación del potencial de hidrógeno del agua residual de la industria del café.



Figura 26

Comprobante de envío de artículo científico a revista Ciencia y tecnología (DIGI USAC)

Clencia, Tecnología y Salud 🔔 👤

← Volver a Envíos

Enviar un artículo

1. Inicio 2. Cargar el envío 3. Introducir los metadatos 4. Confirmación 5. Sigüientes pasos

Archivos Añadir archivo

📄 Artículo agua miel pH objetivo 1 (versión 3).docx	Texto del artículo	Editar	Eliminar
📄 Artículo agua miel pH objetivo 1 (tablas).docx	Otro	Editar	Eliminar
📄 Artículo agua miel pH objetivo 1 (figuras).xlsx	Otro	Editar	Eliminar

Guardar y continuar Cancelar

Figura 27

Conferencia para presentar los resultados de la investigación realizada

The poster features a background of coffee beans. At the top left is the logo of the University of San Carlos (USC) and the INDETEIQ logo, which includes a molecular structure icon and the text 'INVESTIGACIÓN, DESARROLLO TECNOLÓGICO E INNOVACIÓN ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA'. The main title is 'CONFERENCIA EVALUACIÓN DEL TRATAMIENTO DE AGUA RESIDUAL DEL CAFE CON CARBÓN'. Below the title, the date and time are listed: '13 DE ENERO 18:30 HORAS', followed by the URL 'https://bit.ly/3CDc6sb'. Two circular portraits of speakers are shown: IMSc. Ing. Ana Rufina Herrera Soto (Expositora) and MA. Ing. William Eduardo Fagiani Cruz (Expositor). At the bottom left are the logos of USC and FIUSAC (Facultad de Ingeniería, Universidad de San Carlos de Guatemala). At the bottom right, the text reads 'ANABELA CORDOVA DECANA ADMINISTRACIÓN 2019 - 2023'.

Figura 28

Carátula del informe presentado a ANACAFÉ

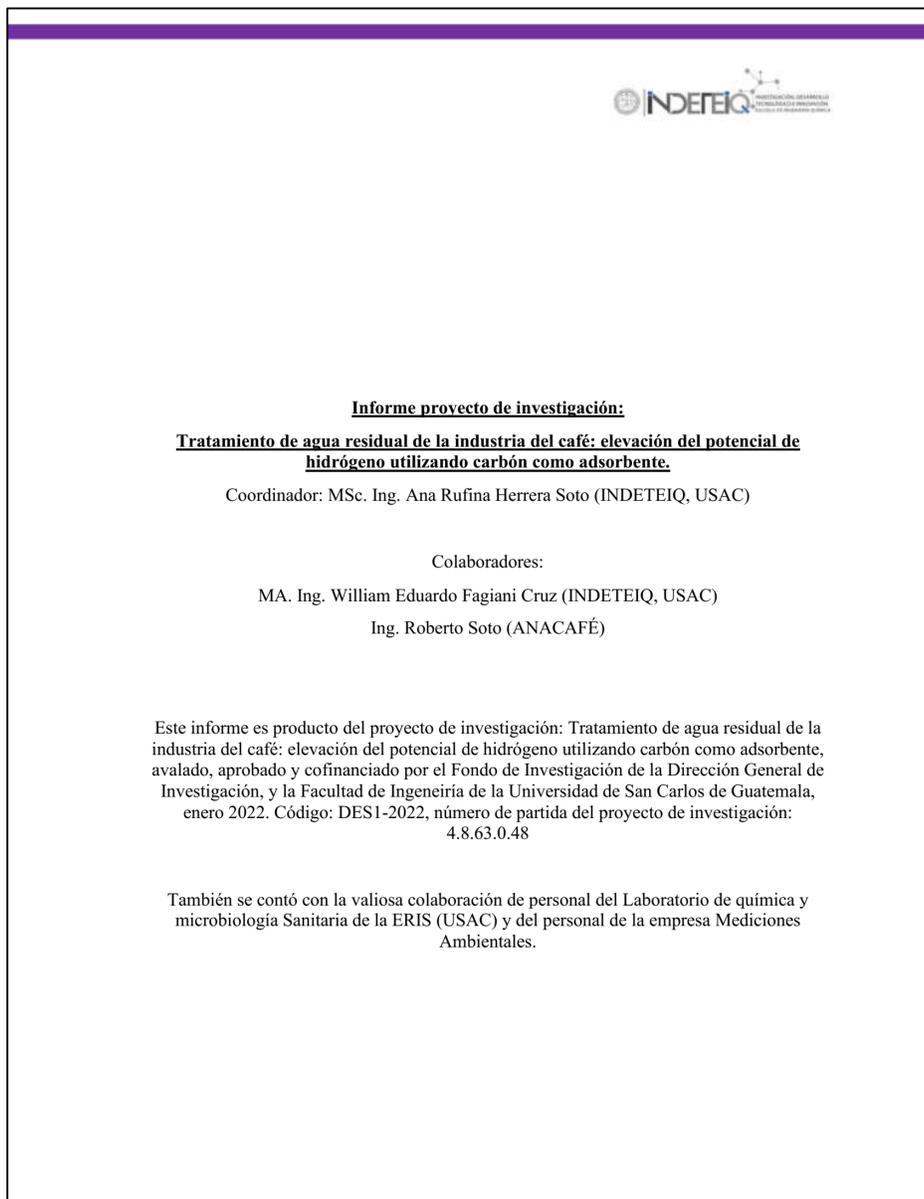


Figura 29

Carta de presentación de informe final de la unidad de Investigación, desarrollo tecnológico e innovación de la Escuela de Ingeniería química



USAC
TRICENTENARIA
Universidad de San Carlos de Guatemala

FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA
ÁREA DE INVESTIGACIÓN, DESARROLLO TECNOLÓGICO E INNOVACIÓN

Edificio T-5, Ciudad Universitaria, Zona 12, Guatemala, Centroamérica
EIQID-REG-002

Guatemala, 12 de enero de 2023.
Ref. EIQ.INDETEC.REG.001.2023.

Doctora
Alice Burgos Paniagua
Dirección General de Investigación
Universidad de San Carlos de Guatemala
Presente

Respetable Doctora Burgos:

Me dirijo a usted, en calidad de coordinador del Área de Investigación, desarrollo tecnológico e innovación de la Escuela de Ingeniería Química (INDETEIQ), para presentarle el **Informe Final** de actividades del proyecto de investigación: **“Tratamiento de agua residual de la industria del café: elevación del potencial de hidrógeno utilizando carbón como adsorbente”**, Código **DES1-2022**, número de partida 4.8.63.0.48. coordinado por **MSc. Ing. Ana Rufina Herrera Soto**.

Me permito presentar esta comunicación debido a que la ingeniera Herrera trabaja en este proyecto en calidad de investigadora de INDETEIQ. De acuerdo con las indicaciones administrativas de DIGI también se hará la presentación formal de este documento por medio de la carta que envía la directora del Centro de Investigaciones de Ingeniería, Inga. Telma Maricela Cano Morales.

Sin otro particular, me suscribo de usted,

"ID Y ENSEÑAD A TODOS"



Ing. William G. Álvarez Mesa, M.I.Q., M.U.I.E.
Coordinador
Área de Investigación, Desarrollo Tecnológico e Innovación
Escuela de Ingeniería Química

C.c: Archivo
WGAM/mcrrm



ACA AI
Asociación de Ingenieros Químicos de Guatemala
Asociación de Ingenieros Químicos de Guatemala



INDETEIQ
INVESTIGACIÓN, DESARROLLO
TECNOLÓGICO E INNOVACIÓN
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA



Formando Ingenieros Químicos en Guatemala desde 1939

14 Aspectos éticos y legales (si aplica)

No aplica a esta investigación.

15 Vinculación

Se recibió el apoyo de la Asociación Nacional del Café, a través del Centro de Investigaciones en Café y sostenibilidad. Esta vinculación se estableció con el fin de tener acceso a muestras de aguas mieles. El personal de la Asociación Nacional del café se encargó de trasladar las muestras de aguas mieles a la Ciudad de Guatemala, para que fueran utilizadas en los experimentos realizados. Además, es necesario mencionar que ANACAFÉ proporcionó las muestras de residuo de café percolado utilizadas en esta investigación.

Se contó con el apoyo de la empresa Mediciones Ambientales, quienes prestaron parte de su equipo de laboratorio para desarrollar partes esenciales de este trabajo de investigación.

16 Estrategia de difusión, divulgación y protección intelectual

La difusión de resultados de este trabajo de investigación se llevó a cabo por medios escritos y mediante conferencias y entrevistas.

- En Julio del 2022 se presentaron resultados parciales de este trabajo de investigación en la conferencia impartida para el XXVII Congreso Latinoamericano de Estudiantes de Ingeniería Química: Tratamiento del agua residual de la industria del café (figura 23)
- En agosto del 2022 se brindó una entrevista, para la franja radial de la Facultad de Ingeniería, titulada: Agua residual de la industria del café tratamiento e investigación (figura 24)
- En octubre del 2022 se presentaron resultados parciales de este trabajo de investigación en la conferencia impartida para el primer congreso de INDETEIQ: Uso de carbón activado para la elevación del potencial de hidrógeno del agua residual de la industria del café (figura 25).
- En agosto del 2022 se presentó a la revista “Ciencia y tecnología” de la DIGI (USAC) un artículo científico con los resultados de este trabajo de investigación (figura 26).
- En enero del 2023 se presentaron resultados completos de este trabajo de investigación en la conferencia impartida para la Facultad de Ingeniería USAC: Evaluación del tratamiento de agua residual del café con carbón (figura 27).
- En enero del 2023 se entregó al personal del Centro de Investigaciones del Café y sostenibilidad, de la Asociación Nacional del Café, un informe de los resultados de esta investigación (figura 28).

17 Aporte de la propuesta de investigación a los ODS:

Esta propuesta de investigación contribuye a alcanzar el objetivo de desarrollo sostenible 6: agua limpia y saneamiento. Una parte importante de asegurar el acceso a agua potable es llevar a cabo esfuerzos para tratar adecuadamente a las aguas residuales, o reutilizarlas de forma apropiada. En este caso se evaluó la posibilidad de tratar aguas residuales de la industria del café utilizando carbón como adsorbente para reducir la acidez de este tipo de desecho.

Además, esta propuesta de investigación contribuye con el objetivo de desarrollo 12: producción y consumo responsable. Como se dijo anteriormente, el resultado de esta investigación podría permitir identificar una nueva tecnología para implementar en el tratamiento del agua residual de la industria de café, dando un paso para su adecuación para ser reutilizada en procesos de riego. Es decir, esto podría contribuir a reducir la huella ecológica de la industria cafetalera del país.

Informe final proyecto de investigación 2022

Dirección General de Investigación –DIGI-

18 Orden de pago final (incluir únicamente al personal con contrato vigente)

Nombres y apellidos	Categoría (investigador /auxiliar)	Registro de personal	Procede pago de mes (Sí / No)	Firma
No aplica, la Dirección general de investigación no contrató personal para realizar este proyecto de investigación.				

19 Declaración del Coordinador(a) del proyecto de investigación

El Coordinador de proyecto de investigación con base en el *Reglamento para el desarrollo de los proyectos de investigación financiados por medio del Fondo de Investigación*, artículos 13 y 20, deja constancia que el personal contratado para el proyecto de investigación que coordina ha cumplido a satisfacción con la entrega de informes individuales por lo que es procedente hacer efectivo el pago correspondiente.

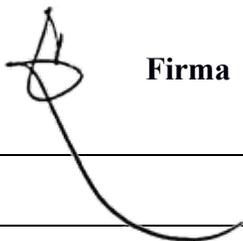
MSc. Ing. Ana Rufina Herrera Soto Coordinador del proyecto de investigación	 Firma
Fecha: 28/02/2023	

Informe final proyecto de investigación 2022

Dirección General de Investigación –DIGI-

20 Aval del Director(a) del instituto, centro o departamento de investigación o Coordinador de investigación del centro regional universitario

De conformidad con el artículo 13 y 19 del *Reglamento para el desarrollo de los proyectos de investigación financiados por medio del Fondo de Investigación* otorgo el aval al presente informe final de las actividades realizadas en el proyecto “**Tratamiento de agua residual de la industria del café: elevación del potencial de hidrógeno utilizando carbón como adsorbente**” en mi calidad de directora del Centro de Investigación de Ingeniería, mismo que ha sido revisado y cumple su ejecución de acuerdo a lo planificado.

<p>Vo.Bo. Ing. Telma Maricela Cano Morales Directora Centro de Investigaciones de Ingeniería</p>	<p> Firma</p> 
<p>Fecha: 28/02/2023</p>	

21 Visado de la Dirección General de Investigación

<p>Vo.Bo. Ing. Liuba Cabrera de Villagrán Coordinadora del Programa Universitario de Investigación</p>	<p> Firma</p>
<p>Fecha: 28/02/2023</p>	

<p>Vo.Bo. Ing. Agr. Rufino Salazar Coordinador General de Programas Universitarios de Investigación</p>	<p> Firma</p> <p><small>Ing. MARI JULIO RUFINO SALAZAR PÉREZ Coordinador General de Programas de Investigación, Digi-Usac</small></p>
<p>Fecha: 28/02/2023</p>	

