

Valoración de lodos de planta de tratamiento de aguas residuales (PTAR) como materia prima para la extracción de lípidos en la obtención de biodiésel

Evaluation of sludge of wastewater treatment plant (WWTP) as raw material for the extraction of lipids in the production of biodiesel

Avaliação de lamas de estação de tratamento de águas residuais (ETAR) como matéria-prima para extração de lipídios na produção de biodiesel

Lina Marcela Mancipe Arias^{1*}; María del Pilar Triviño Restrepo²

¹Estudiante Maestría Ingeniería Ambiental, ²Grupo de Investigación Carbones y Carboquímica, Maestría Ingeniería Ambiental, Escuela de Posgrados, Facultad de Ingeniería, Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia (UPTC),
Avenida central del Norte n.º 39-115, Tunja, Colombia.

*lina.mancipe@uptc.edu.co

Fecha recepción: 15 de agosto de 2017

Fecha aceptación: 20 de abril de 2018

Resumen

En esta investigación se evaluó el potencial de aprovechamiento de los lodos residuales, como materia prima en la producción de biodiésel. Se seleccionaron lodos provenientes de la planta de tratamiento de aguas residuales (PTAR) del municipio de Sotaquirá (Boyacá, Colombia) y se les determinó el contenido de sólidos totales (ST), sólidos volátiles (SV), concentración de metales pesados, composición química, morfología y microestructura del lodo. La extracción de los lípidos y ácidos grasos se realizó por el método Soxhlet, de acuerdo al Standard Methods 5520E, con algunas modificaciones, usando como solventes n-hexano y metanol, bajo dos tiempos de extracción 4 y 2,5 horas. Los datos obtenidos evidenciaron, con respecto a los lodos, que los sólidos volátiles son altos, lo que confirma un importante contenido de materia orgánica. Los rendimientos en la extracción de los lípidos en base seca con n-hexano y metanol fueron de 33 y 28 % a 4 horas, mayores que a 2,5 horas de 19 y 17 % respectivamente, lo que indica que el tiempo es una variable significativa en el porcentaje de extracción. Los valores presentados por los índices de acidez de los extractos fueron de 215 % y 208 %, lo que significa que la grasa extraída contiene una elevada cantidad de ácidos grasos libres que serán transformados a biodiésel por medio de esterificación. Con los resultados obtenidos, los lodos provenientes de plantas de tratamiento de aguas residuales domésticas representan una alternativa de materia prima para la extracción de lípidos y ácidos grasos libres en la obtención de biodiésel.

Palabras clave: lodo de PTAR, extracción, ácidos grasos libres, metales pesados, lípidos, biodiésel.

Abstract

This research we evaluated the potential for use of sewage sludge as a raw material in the production of biodiesel. Sludge coming from the Wastewater Treatment Plant (WWTP) were selected from Sotaquirá (Boyacá, Colombia) and the total solid content was determined (TS), volatile solids (VS), heavy metals concentration, chemical composition, morphology and microstructure of the sludge. Extraction of lipids and fatty acids was carried out by the Soxhlet method according to Standard Methods 5520E with some modifications, using as solvents n-hexane and methanol, under two extraction times between 4 and 2.5

hours. Data obtained showed according to the sludge, that volatile solids are high, which confirms an important organic matter content. The yields on lipid extraction on dry basis with n-hexane and methanol were 33 and 28% at 4 hours, greater than at 2.5 hours at 19 and 17% respectively, indicating that time is a significant variable in the extraction percentage. The values presented by the acid indexes of the extracts were 215% and 208%, it means that the extracted fat contains a high amount of free fatty acids that will be transformed into biodiesel by means of esterification. With the obtained results, the sludge from domestic wastewater treatment plants represent alternative raw material for the extraction of lipids and free fatty acids in the production of biodiesel.

Keywords: *sludge from WWTP, extraction, free fatty acids, heavy metals, lipids, biodiesel.*

Resumo

Nesta pesquisa foi avaliado o potencial de aproveitamento dos lodos residuais, como matéria prima na produção de biodiesel. Foram selecionadas lamas da estação de tratamento de águas residuais (ETAR) da cidade de Sotaquirá – Boyacá, Colômbia, determinando-se o conteúdo de sólidos totais (ST), sólidos voláteis (SV), concentração de metais pesados, composição química, morfologia e microestrutura da lama. A concentração de lípidos e ácidos graxos realizou-se pelo método Soxhlet de acordo com o Standard Methods 5520E com algumas modificações, usando como solventes n-hexano e metanol, sob dos tempos de extração 4.0 e 2.5 horas. Em relação às lamas, os dados mostraram que os sólidos voláteis são altos, conferindo um importante conteúdo de matéria orgânica. Os rendimentos na extração dos lípidos em base seca com n-hexano e metanol foram de 33.0% e 28.0% com 4 horas, maiores que com 2.5 horas com 19.0 % e 17.0% respectivamente, indicando que o tempo é uma variável significativa na taxa de extração. Os valores obtidos pelos índices de acidez nas amostras foram 215.0% e 208.0%, o que significa que a graxa extraída contém uma elevada quantidade de ácidos graxos livres que serão transformados em biodiesel através de esterificação. Com os resultados obtidos, as lamas das ETARs domésticas representam uma matéria prima alternativa para a extração de lípidos e ácidos graxos livres na produção de biodiesel.

Palavras chave: *lama de ETAR, extração, ácidos graxos livres, metais pesados, lípidos, biodiesel.*

Introducción

La purificación del agua mediante el uso de plantas de tratamiento de aguas residuales (PTAR) lleva a la generación de lodos, los cuales presentan una variedad de compuestos: materia orgánica, nutrientes, metales pesados y presencia de organismos patógenos, situación que en la mayoría de los casos dificulta su aprovechamiento y disposición final [1], y se convierte en un potencial contaminante del medioambiente. Una alternativa de aplicación es como abono, pero en algunos países del mundo está restringido, el abono debido a los malos olores, sustancias tóxicas y productos químicos farmacéuticos que pueden estar presentes en ellos. Incluso, la incineración de lodos puede generar emisiones que contienen metales pesados y dioxinas [2]. En algunos casos, los lodos son arrojados a los sistemas de alcantarillado, pero el vertimiento a las fuentes hídricas consume la cantidad de oxígeno disponible para la vida acuática en las aguas receptoras, al igual que produce gases

malolientes [2]. Por esto, comúnmente se disponen en rellenos sanitarios lo que aumenta el riesgo de colapso y pérdida rápida de su vida útil. La eliminación de los lodos en vertederos implica la pérdida de energía química y problemas en la salud humana. La presencia de compuestos tóxicos como metales pesados son peligrosos para plantas y animales, y adicionalmente pueden contener fósforo y nitrógeno, que conducen a un crecimiento incontrolado de plantas acuáticas [3]. Hoy en día la mayor parte de la energía que se usa en el mundo proviene de los combustibles fósiles, cuyo uso ha causado problemas ambientales, aumentando la contaminación del aire y las emisiones efecto invernadero, así como el agotamiento de los recursos naturales [4]. Por esta razón, se tiene la necesidad de proveer biocombustibles renovables, biodegradables, menos tóxicos, seguros para el almacenamiento y manipulación, de la mano con el desarrollo sostenible del país. El biodiésel es un combustible de origen vegetal que puede reemplazar al combustible de origen fósil, diésel o ACPM, lo

que proporciona una densidad de energía similar a la del diésel hecho con petróleo, y se presenta como una alternativa para el desarrollo sostenible, al reducir la emisión de contaminantes al medio ambiente [5].

La producción de biodiesel se logra a través de diferentes tipos de materias primas, cuya naturaleza depende de la posición geográfica y el clima del lugar. Actualmente, predominan el aceite de soja en los EE.UU., aceite de canola en Canadá, el aceite de colza y girasol en Europa, el aceite de palma en los países tropicales y en el sudeste de Asia. También han cobrado importancia los aceites de fritura usados (conocidos como grasas amarillas), los aceites no comestibles, las grasas animales (especialmente sebo vacuno) [6,7], así como el uso de las algas cultivadas para este fin [8]. El inconveniente que impide un aumento en el consumo de biodiésel es el alto costo de producción. Según algunas investigaciones, la adquisición de materia prima representa actualmente entre el 70 % y 95 % [9,10] de los gastos de producción de biodiésel, que es una seria amenaza para la viabilidad económica de la industria. Una producción sostenible de biodiésel debe incluir la diversificación de materias primas, no solo para apuntar a la reducción de costes, sino también para permitir la implementación de alternativas “verdes”, con un impacto ambiental reducido [11]. En este sentido, la obtención de biodiésel a partir de lodos de PTAR ha recibido considerable atención en los últimos años, lo que resulta en el desarrollo y aplicación de diferentes métodos para la extracción de la fracción lipídica como materia prima y su posterior esterificación/transesterificación [5].

Es por eso que esta investigación tiene como objetivo caracterizar física, química y estructuralmente los lodos provenientes de plantas de tratamiento de aguas residuales del municipio de Sotaquirá, Boyacá, como materia prima en la obtención de biodiésel, y evaluar el efecto del tiempo en el porcentaje de extracción de los lípidos y ácidos grasos libres, utilizando n-hexano y etanol.

Metodología

Recolección y Caracterización de Lodos

El lodo se muestreó en la planta de tratamiento de aguas residuales (PTAR) del municipio de Sotaquirá, ubicada en el departamento de Boyacá,

Provincia Centro, en las coordenadas 5°46' 52" de latitud Norte, 73° 15' de longitud oeste del meridiano de Greenwich, aproximadamente a 39 Km de la ciudad de Tunja. Se tomaron muestras de lodo primario frescas provenientes de los lechos de secado de lodos, en recipientes de plásticos sellados herméticamente. Las muestras fueron llevadas al laboratorio y se preservaron a una temperatura de 4 °C por un tiempo no máximo a 10 días.

El lodo se caracterizó con el fin de determinar el pH, el contenido de sólidos totales (ST) y sólidos volátiles (SV) por método gravimétrico, según Standard Methods 2540 G [12]. Por otro lado, se determinó el contenido de metales pesados por absorción atómica, mediante digestión ácida por el método EPA 3051 y la cuantificación de metales por Standard Methods 3111 B y 3114 C [13,14]; se analizó la composición química de los lodos por espectrometría de fluorescencia, por energía dispersa mediante el análisis por fluorescencia de rayos X (FRX) y caracterización por microscopía electrónica de barrido (MEB) y microanálisis por espectrometría de dispersión de energía de rayos X (EDX), para conocer la morfología, microestructura y la composición del lodo a 2000 X, 5000 X y 10000 X.

Extracción y Caracterización de Lípidos y Ácidos Grasos

La extracción de lípidos y ácidos grasos se efectuó por el método estándar SM5520E [15], con algunas modificaciones, usando como solventes n-hexano C_6H_{14} y metanol CH_3OH (grado analítico, Merck) a dos tiempos de extracción 2,5 y 4 horas. Para el estudio se planteó un diseño experimental correspondiente a un diseño factorial 2^2 para determinar si los tratamientos difieren significativamente en la extracción de lípidos a partir de lodos de PTAR. En la tabla 1, se presentan las combinaciones de los tratamientos, la matriz y el plan de experimentos y el rendimiento de la extracción. La cantidad de muestras a tratar fueron 4, razón por la cual se planteó el tratamiento de los datos por medio de un diseño factorial 2^k . Donde el efecto se denotó con letra mayúscula “A” y “B”, la interacción de los dos efectos con AB y las combinaciones de los tratamientos se designaron con letras minúsculas (tabla 1). Este diseño es el más sencillo y es representado por un cuadrado [16].

Tabla 1. Diseño experimental 2² para la muestra de estudio.

Combinaciones de Tratamientos	Matriz de Experimentos		Plan de Experimentos*		Rendimiento de la Extracción %**		
	X ₁	X ₂	Solvente	Tiempo (h)	I	II	III
1	-	-	n-Hexano	2,5	19,4272	19,5064	19,5064
A	+	-	Metanol	2,5	17,7487	17,3963	17,9664
B	-	+	n-Hexano	4	34,4905	32,8952	33,8724
AB	+	+	Metanol	4	28,1790	27,6889	28,3678

*Variables independientes: tipo de solvente (n-hexano y metanol) y tiempo de extracción (2,5 y 4 horas).

**Variable dependiente: Rendimiento de la extracción de grasa obtenida.

La caracterización de la grasa obtenida se hizo por medio de la determinación del índice de acidez según la norma NTC 218, por titulación con metanol caliente, usando indicador y el índice de yodo, según la metodología empleada por Rodríguez Vinasco [17], teniendo como referencia la norma NTC 335.

Resultados y Discusión

Caracterización Lodo de PTAR

Los parámetros determinados del lodo se presentan en la tabla 1, donde se hace una comparación con los rangos reportados por Turovskiy *et al.* [18], y por Donado [19]. El pH del lodo es neutro, y el contenido de sólidos volátiles es alto, lo que indica que posee gran cantidad de materia orgánica. La composición del lodo varía durante el tratamiento de las aguas residuales y depende del proceso específico aplicado; los valores de los lodos reportados de la PTAR de Sotaquirá se encuentran dentro de los rangos establecidos por otros autores.

La producción de lodos en una planta de tratamiento de agua residuales domésticas depende de la carga superficial, el tipo de tratamiento, entre otros. En la PTAR de Sotaquirá, los lodos frescos son generados principalmente en la etapa de tratamiento primario que consta de un sedimentador primario, un reactor UASB, digestor de lodos y un tanque Imhoff. La muestra fue tomada del lecho de secado de lodos; presentó un color gris y negro, un olor nauseabundo y un aspecto blando.

Teniendo en cuenta el decreto 1287 de 2014 que establece los criterios para el uso de biosólidos generados en plantas de tratamiento de aguas residuales municipales, se cuantificaron los metales pesados presentes en la muestra de estudio. Los resultados obtenidos se presentan en la Tabla 3, donde se observa que el contenido de los metales está por debajo de los valores máximos permisibles establecidos en el artículo 5 del decreto anteriormente mencionado.

Tabla 2. Parámetros para la caracterización de lodos.

Parámetro	Unidades	Lodo Primario	Lodo Primario *	Lodo crudo**
pH		7,127 ± 0,007	5-8	5-8
Sólidos Totales	%	6,5464 ± 0,2616	2-7	2-8
Sólidos Volátiles	%	75,3339 ± 0,1288	60-80	60-80

Rango de parámetros reportados en *Turovskiy *et al.* [18] y por **Donado [19].

Estos lodos, con un tratamiento adecuado, pueden ser usados en zonas verdes, tales como separadores viales, campos de golf y lotes vacíos; como producto para uso en áreas privadas (jardines, antejardines, patios, plantas ornamentales y arborización), en agricultura y plantaciones forestales; como insumos en procesos de elaboración de abonos o fertilizantes orgánicos, para remediación de suelos contaminados, como insumo en la fabricación de materiales de construcción, en la estabilización

de taludes de proyectos de la red vial nacional, red vial secundaria o terciaria, en actividades de revegetalización y paisajismo de escombreras y, en procesos de valorización energética [20]. Los principales constituyentes del lodo primario incluyen silicio, aluminio, hierro, calcio, entre otros. En la tabla 4, se muestran los componentes de minerales determinados por fluorescencia de rayos X, en comparación con los minerales constituyentes de lodos de una industria de

beneficio de arcillas [21], de la PTAR de Sungai Dua Penang en Malaysia [22] y de la PTAR de Sadat Minufiya en Egipto [23]. La composición del lodo de Sotaquirá muestra un alto contenido de óxido de silicio (SiO_2) seguido de óxido de aluminio (Al_2O_3), con algunos óxidos inorgánicos en menor proporción. Los contenidos de óxidos de silicio y de aluminio se presentan en mayor proporción, debido a que son constituyentes principales en el suelo

natural. La presencia de óxido de aluminio (Al_2O_3) en los lodos también se debe a los coagulantes usados dentro del tratamiento de aguas. El óxido de hierro (Fe_2O_3), además de ser un constituyente del suelo natural, puede ocasionar el color naranja en lodos en grandes cantidades [22]. P_2O_5 , K_2O y el SO_3 son macronutrientes del suelo necesarios para el crecimiento de las plantas. El TiO_2 ayuda a la aceleración de reacciones provocadas por la luz.

Tabla 3. Contenido de metales pesados en lodos de Sotaquirá.

Metal	Unidades	Valores máx. Permisibles		Lodo Sotaquirá
		A	B	
Arsénico (As)		20	40	<0,01
Cadmio (Cd)		80	40	< 0,05
Cobre (Cu)		1000	1750	3,71
Cromo (Cr)		1000	1500	< 0,1
Mercurio (Hg)	mg/Kg	10	20	<0,01
Molibdeno (Mo)	(base seca)	18	75	-----
Níquel (Ni)		80	420	0,11
Plomo (Pb)		300	400	< 0,3
Selenio (Se)		36	100	<0,01
Zinc (Zn)		2000	2800	47,15

Tabla 4. Caracterización química del lodo de PTAR.

Elemento	Lodo Sotaquirá	Lodo Industrial beneficio arcillas ^a	Lodo Malasia ^b	Lodo Sadat Egipto ^c
SiO_2	50,50	58,93	40,33	57,70
Al_2O_3	22,10	25,21	31,84	18,47
Fe_2O_3	8,66	0,57	6,43	10,57
CaO	6,55	0,80	0,09	5,30
P_2O_5	4,50	-----	0,14	1,58
K_2O	2,98	-----	1,32	1,54
TiO_2	1,88	0,70	0,46	1,09
SO_3	1,50	-----	0,14	-----

^a Llano *et al.* 2014. ^b Ling *et al.* 2017. ^c García *et al.* 2010

El lodo seco, tomado de la PTAR de Sotaquirá, analizado por el microscopio electrónico de barrido, presenta una estructura amorfa con presencia de agregados propios de arenas, limos y arcillas. En la figura 1, se observa la microestructura del lodo a dos aumentos, 10.000 X y 5.000 X y el espectro EDS, el cual indicó la presencia de un alto contenido de oxígeno (57,91) y carbono (19,61), presencia de silicio (11,84), aluminio (8,91) y magnesio (1,73) que corresponden a

porcentajes atómicos. Se encontró que el oxígeno es el elemento con mayor porcentaje, debido a la presencia de minerales de óxido. El contenido de silicio y aluminio se podría originar de minerales de silicato y aluminosilicatos [22]. El contenido de carbono es debido a la materia orgánica presente en el lodo, debido a microorganismos durante el almacenamiento de la muestra; y la presencia de magnesio se puede asociar a la capacidad de intercambio de cationes.

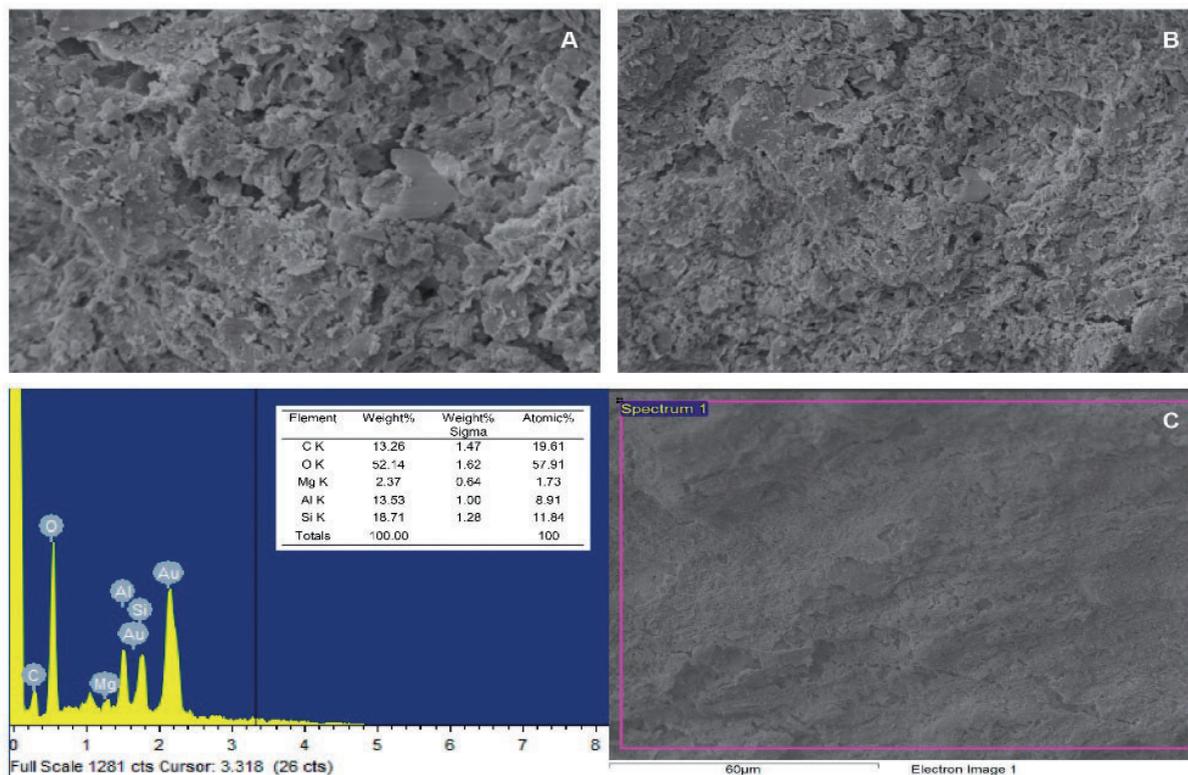


Figura 1. Microestructura del lodo, A 10.000 X , B 5.000 X y C espectro EDS.

Extracción de lípidos y ácidos grasos

La figura 2 muestra los porcentajes de extracción de lípidos y ácidos grasos con n-hexano y metanol a 2,5 y 4 horas. Se observa que la extracción con n-hexano es mayor en los dos tiempos de extracción con porcentajes de 19,48 % y 33,75 %, en cambio, la extracción con metanol en los dos tiempos planteados es menor, con porcentajes de 17,70 % y 28,07 %. Comparando los resultados obtenidos por otros autores, se puede decir que los valores reportados de lípidos extraídos a partir de lodos de PTAR se encuentran, en menor porcentaje, con rendimientos del 27 % [24], 26,9 y 27,6 % [25] y 25,3 % [5]. Lo anterior indica que la mayor grasa obtenida posee lípidos apolares que son fácilmente extraídos por n-hexano, porque derivan del glicérido en el agua; en cambio, el uso de metanol podría extraer una mayor fracción de ácidos grasos libres polares [26,27].

La fracción lipídica que proviene de los lodos primarios es materia orgánica, que es una combinación de grasa y sólidos flotantes, originada a partir de aguas residuales crudas; tal es el caso de los lodos tratados. La fracción lipídica proveniente de lodos secundarios es

debida a sustancias poliméricas extracelulares y de la membrana celular de los microorganismos, los cuales se producen durante los tratamientos biológicos de las aguas residuales primarias tratadas [5,24].

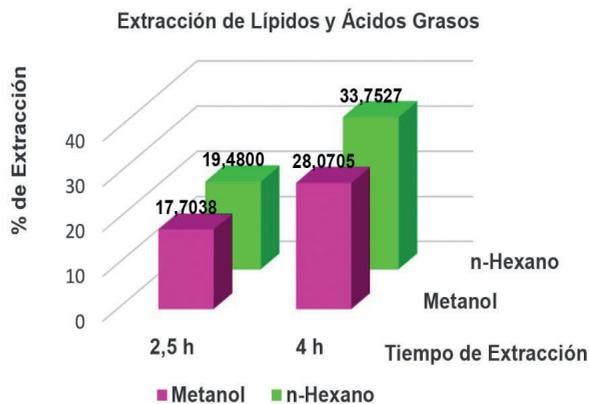


Figura 2. Porcentaje de extracción de lípidos y ácidos grasos.

Se realizó un diseño experimental 2², donde se combinaron dos variables (X_1 : tiempo de extracción y X_2 : tipo de solvente), el modelo arroja que la

variable 1 tiene un efecto positivo y es mayor, lo que indica que el porcentaje de extracción influye más con el tiempo de extracción, que con el tipo de solvente. El análisis de varianza del diseño experimental indica que el tiempo de extracción, en función del grado de significancia, siempre va a influir en la extracción de lípidos y ácidos grasos libres, con una confiabilidad del 97 %, mientras que, para el tipo de solvente también se acepta, pero no influye como el tiempo de extracción.

Tabla 5. Contenido de índice de acidez e índice de yodo de los lípidos extraídos.

Solvente	Unidades	n-Hexano	Metanol
Índice de Acidez	%	215,7692	208,1633
Índice de Yodo	%	16,4821	17,2468

La tabla 5 muestra los valores de índice de acidez y yodo de los lípidos obtenidos con n-hexano y metanol. El valor de índice de acidez es alto para los dos solventes, lo que indica que el extracto contiene una elevada cantidad de ácidos grasos libres, la cual es inconveniente en la producción de biodiésel por dos factores. En primer lugar, se pueden presentar reacciones de saponificación (producción de jabón) durante la transesterificación, para lo cual es necesario hacer primero una esterificación donde se conviertan la gran mayoría de ácidos grasos libres en ésteres. En segundo lugar, la presencia de ácidos grasos libres, junto con un alto contenido de agua, facilitan las condiciones de hidrólisis, disminuyendo el rendimiento de la producción y la cantidad de biodiesel obtenido [28]. El índice de yodo para la extracción con n-hexano y metanol es bajo, con respecto a estudios realizados de aceites de cocina desechados, usados y frescos [29], así como extracciones de lípidos a partir de microalgas [30], lo que sugiere una menor proporción de enlaces insaturados.

Conclusiones

La planta de tratamiento de aguas residuales del municipio de Sotaquirá departamento de Boyacá, genera un lodo libre de metales pesados, con un alto contenido de óxido de silicio y óxido de aluminio, lo que indica que, con un tratamiento adecuado puede ser usado para actividades como remediación de suelos contaminados, insumos en procesos de elaboración de abonos o fertilizantes orgánicos, entre otros.

El porcentaje de extracción de lípidos y ácidos grasos es mayor usando como solvente n-hexano, a un tiempo de extracción de 4 horas, en comparación con los lípidos extraídos con el metanol, lo que indica que los ácidos grasos son de tipo apolar y polar.

El porcentaje de extracción de lípidos y ácidos grasos provenientes de la PTAR de Sotaquirá es alto, debido al elevado contenido de sólidos volátiles reportados en comparación con resultados obtenidos por otros autores. Lo que los hace una fuente de materia prima para la producción de biocombustibles.

El porcentaje de índice de acidez de los lípidos extraídos con los dos tipos de solvente es alto; esta puede ser una limitante para la producción de biodiésel por esterificación/transesterificación, debido a que con un alto contenido de ácidos grasos libres puede generar reacciones de saponificación e hidrólisis, lo que afecta la calidad y el rendimiento del biodiésel.

Con los resultados obtenidos, se puede considerar que los lodos provenientes de plantas de tratamiento de aguas residuales domésticas del municipio de Sotaquirá, del departamento de Boyacá, son una alternativa para la extracción de lípidos y ácidos grasos, así como para actividades en agricultura y remediación de suelos, por no ser peligrosos, lo que puede generar una mitigación del impacto ambiental generado por su mala disposición final y proveer una opción de materia prima que puede reemplazar tanto los combustibles fósiles como los aceites comestibles tradicionales, por sus bajos costos, fácil adquisición y más amigables con el medioambiente; todo lo cual evita el agotamiento de los recursos naturales.

Referencias bibliográficas

- [1] Valderrama Pedraza ML. Factibilidad de aprovechamiento de los lodos de la PTAR del municipio de Chinavita (Boyacá) (sitio en Internet). Universidad de Manizales. Disponible en: <http://ridum.umanizales.edu.co:8080/xmlui/handle/6789/944>.
- [2] Tyagi VK, Lo SL. Sludge: a waste or renewable source for energy and resources recovery?. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2013;25:708-28.
- [3] Filipović J, Grčić I, Bermanec V, Kniewald

- G. Monitoring of total metal concentration in sludge samples: Case study for the mechanical–biological wastewater treatment plant in Velika Gorica, Croatia. *Science of the total environment*. 2013;447:17-24.
- [4] Siddiquee MN, Rohani S. Experimental analysis of lipid extraction and biodiesel production from wastewater sludge. *Fuel processing technology*. 2011;92(12):2241-51.
- [5] Olkiewicz M, Fortuny A, Stüber F, Fabregat A, Font J, Bengoa C. Evaluation of different sludges from WWTP as a potential source for biodiesel production. *Procedia Engineering*. 2012;42:634-43.
- [6] Hoekman SK, Broch A, Robbins C, Cenicerros E, Natarajan M. Review of biodiesel composition, properties, and specifications. *Renewable and sustainable energy reviews*. 2012;16(1):143-69.
- [7] Atadashi IM, Aroua MK, Abdul Aziz AR, Sulaiman NMN. The effects of catalysts in biodiesel production: A review. *Journal of industrial and engineering chemistry*. 2013;19(1):14-26.
- [8] Mier MAM, Vargas FES, Fajardo CAG. Producción y caracterización de biodiesel a partir de aceite de pollo. *Informador Técnico*. 2012;76:62.
- [9] Lin L, Cunshan Z, Vittayapadung S, Xiangqian S, Mingdong D. Opportunities and challenges for biodiesel fuel. *Applied energy*. 2011;88(4):1020-31.
- [10] Balat M. Potential alternatives to edible oils for biodiesel production—A review of current work. *Energy conversion and management*. 2011;52(2):1479-92.
- [11] Dias JM, Santos E, Santo F, Carvalho F, Alvim-Ferraz MCM, Almeida MF. Study of an ethylic biodiesel integrated process: Raw-materials, reaction optimization and purification methods. *Fuel Processing Technology*. 2014;124:198-205.
- [12] Rice EW, Baird RB, Eaton AD, Clesceri LS. 2540 Solids. En: *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*. 22nd ed. Washington: American Public Health Association; 2012. p. 55–61.
- [13] Rice EW, Baird RB, Eaton AD, Clesceri LS. 3111 Metals by flame atomic absorption spectrometry. En: *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*. 22nd ed. Washington: American Public Health Association; 2012. p. 10.
- [14] Rice EW, Baird RB, Eaton AD, Clesceri LS. 3114 Arsenic and selenium by hydride generation/atomic absorption spectrometry. En: *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*. 22nd ed. Washington: American Public Health Association; 2012. p. 6.
- [15] Rice EW, Baird RB, Eaton AD, Clesceri LS. 5520 Oil and grease. En: *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*. 22nd ed. Washington: American Public Health Association; 2012. p. 34–40.
- [16] Montgomery DC. *Diseño y Análisis de Experimentos*. Segunda Ed. México: Limusa Wiley; 2004. 681 p.
- [17] Vinasco JA. Implementación del análisis cuantitativo de índice de yodo para aceite de palma, aceite de pescado y sebo, en la compañía industrial de productos agropecuarios (CIPA SA) (tesis doctoral). Pereira, Colombia: Universidad Tecnológica de Pereira; 2013.
- [18] Turovskiy IS, Mathai PK. *Wastewater sludge processing*. Canada: Wiley Interscience A John Wiley and Sons, INC.; 2006.
- [19] Donado HR. Plan de gestión para lodos generados en las par-d de los municipios de Cumaral y San Martín de los llanos en el departamento del Meta (tesis de maestría) Pontificia Universidad Javeriana; 2013.
- [20] Ministerio de vivienda, ciudad y territorio. Decreto número 1287 de 2014. Bogotá, Colombia; 2014.
- [21] Llano BA, Cardona JF, Ocampo D, Ríos LA. Tratamiento fisicoquímico de las aguas residuales generadas en el proceso de beneficio de arcillas y alternativas de uso de los lodos generados en el proceso. *Información tecnológica*. 2014;25(3):73-82.
- [22] Ling YP, Tham R-H, Lim S-M, Fahim M, Ooi C-H, Krishnan P, et al. Evaluation and reutilization of water sludge from fresh water processing plant as a green clay substituent. *Applied Clay Science*. 2017;143:300-6.
- [23] Valles MG, Ali MH, Hafez HS, Carulla JMN, Torró L, Manent SM. Caracterización de los Lodos de la Depuradora de Sadat (Minufiya, Egipto) para la Obtención de un Material Vitrocerámico. *Macla: revista de la Sociedad Española de Mineralogía*. 2010;(13):95-6.
- [24] Olkiewicz M, Fortuny A, Stüber F, Fabregat A, Font J, Bengoa C. Effects of pre-treatments on the lipid extraction and biodiesel production

- from municipal WWTP sludge. Fuel. 2015;141:250-7.
- [25] Olkiewicz M, Plechkova N V., Fabregat A, Stüber F, Fortuny A, Font J, et al. Efficient extraction of lipids from primary sewage sludge using ionic liquids for biodiesel production. Separation and Purification Technology. 2015;153:118-25.
- [26] Zhu F, Zhao L, Zhang Z, Jiang H. Preliminary study at lipids extraction technology from municipal sludge by organic solvent. Procedia Environmental Sciences. 2012;16:352-6.
- [27] Melero JA, Sánchez-Vázquez R, Vasiliadou IA, Martínez Castillejo F, Bautista LF, Iglesias J, et al. Municipal sewage sludge to biodiesel by simultaneous extraction and conversion of lipids. Energy Conversion and Management. 2015;103:111-8.
- [28] Bulla Pereira E, Guerrero Fajardo C. Diseño del proceso de producción del biodiesel a partir de aceites de fritura. Colombia: Universidad Nacional de Colombia; 2014
- [29] Murcia Ordoñez B, Chaves LC, Rodríguez-Pérez W, Andredy Murcia M, Alvarado ER. Caracterización de biodiesel obtenido de aceite residual de cocina. Revista Colombiana de Biotecnología. 2013;15(1):61-70.
- [30] Tejada Benítez L, Henao Argumedo D, Alvear Alayón M, Castillo Sanldarriaga CR. Caracterización y perfil lipídico de aceites de microalgas. Facultad de Ingeniería. 2015;24(39):43-54.