

ARTÍCULO DE INVESTIGACIÓN / RESEARCH ARTICLE

<http://dx.doi.org/10.14482/inde.38.1.628.16>

Uso de la cáscara de coco (*Cocos nucifera*) como medio filtrante en el tratamiento del agua del campo El Salto, Venezuela

*Use of the coconut shell
(Cocos nucifera) as a filtering
medium in the water treatment
of El Salto oilfield, Venezuela*

ANDREA YESEBEL RONDÓN PERDOMO *

LUIS ANTONIO CASTILLO CAMPOS **

JIMMY MIRANDA ***

*Universidad de Oriente, Núcleo de Monagas, Escuela de Ingeniería y Ciencias Aplicadas, Departamento de Ingeniería de Petróleo, Laboratorio de Procesamiento de Hidrocarburos. Ingeniero de Petróleo de la Universidad de Oriente (UDO). andreyesebel30@gmail.com

**Universidad de Oriente, Núcleo de Monagas, Escuela de Ingeniería y Ciencias Aplicadas, Departamento de Ingeniería de Petróleo, Laboratorio de Procesamiento de Hidrocarburos. Ingeniero de Petróleo y MSc. en Finanzas de la Universidad de Oriente (UDO), Docente investigador con categoría de agregado. lcastillo@udo.edu.ve

***Empresa Mixta Petrodelta, S.A, Superintendencia de Fluidos y Corrosión. Ingeniero Metalúrgico de la Universidad Nacional Experimental Politécnica Antonio José De Sucre (Unexpo). jmiranda728@gmail.com

Correspondencia: Luis Antonio Castillo Campos, Universidad de Oriente, Núcleo de Monagas, Campus Los Guaritos, Edificio EICA, Avenida Universidad.



Resumen

La filtración es una etapa de purificación que elimina los sólidos suspendidos y los restos de aceites presentes en el agua. Este proceso de separación tiene su basamento principal en el uso de un medio con características de porosidad y permeabilidad idóneas. Por tanto, se evaluó el uso de la cáscara de coco (*Cocos nucifera*) como medio filtrante alternativo en el tratamiento del agua del campo El Salto. Para esto se realizó una caracterización de las condiciones originales del agua de procesos, así como la pulverización de la cáscara del coco, seguido de la consecuente selección de partículas de 1 mm, 2 mm y 3 mm implementados para medir la eficacia del proceso de filtración. Una vez desarrollada la investigación se observó que la aplicación de un tamaño de partícula de 2 mm generó una disminución en la concentración de sólidos suspendidos desde 170 mg/L a 53 mg/L, representando una eficacia del 68,82 %. Por otra parte, el descenso de la concentración de aceites en agua manifestó una eficacia del 98,55 %, de lo cual se concluye que el material orgánico pulverizado en un tamaño de partícula de 2 mm es una alternativa viable que representaría una reducción en los costos de tratamiento.

Palabras clave: aceite en agua, agua de procesos, cáscara de coco, filtración, sólidos suspendidos.

Abstract

Filtration is a purification stage that eliminates the suspended solids and remnants of oils present in water. This separation process has its main foundation through the use of a medium with suitable porosity and permeability characteristics with the purpose of implementing new alternatives during the treatment. Therefore, the use of coconut husk (*Cocos nucifera*) was evaluated as an alternative filter medium in the water treatment of El Salto Oilfield. For this purpose, a characterization of the original process water conditions was performed, as well as the pulverization of the coconut shell, followed by the consequent selection of particles of 1 mm, 2 mm and 3 mm implemented to measure the effectiveness of the filtration process. Once the research was developed, it was observed that the application of a particle size 2 mm generated a decrease in the concentration of suspended solids from 170 mg / L to 53 mg / L, representing an efficiency of 68,82%. On the other hand, the decrease in the concentration of oils in water showed an efficiency of 98,55%, concluding that the pulverized organic material in a particle size of 2 mm is a viable alternative that would represent a reduction in treatment costs.

Keywords: coconut shell, filtration, oil in water, process water, suspended solids.

1. INTRODUCCIÓN

El agua es un recurso que se encuentra presente en la mayoría de los campos petroleros, bien sea en forma emulsionada o libre, al ser su producción un factor que se ve incrementado a lo largo del tiempo [1]. Esta agua se separa del petróleo hasta lograr reducir su contenido a un porcentaje por lo general inferior al 1 % [2], ya que altos porcentajes de esta reducen la rentabilidad del proceso.

Al iniciar el tratamiento de deshidratación de crudo, una parte del agua producida por el pozo petrolero, denominada “agua libre”, se separa fácilmente por acción de la gravedad dentro de los separadores, y la emulsionada se libera por medio de la aplicación de temperatura, química desemulsificante y agitación mecánica. Esto permite su separación [2] hasta lograr reducir su contenido al porcentaje previamente especificado. El agua resultante se redirecciona hasta los equipos de tratamiento a fin de disminuir la concentración de una o más de las impurezas presentes que ocasionan problemas durante su disposición final, al mismo tiempo que se cumple con la normativa del país. Es importante señalar que el vertido directo o un tratamiento inadecuado de las aguas industriales constituyen una de las principales causas de la degradación de los ecosistemas asociados, toda vez que estas presentan una serie de compuestos que varían dependiendo del proceso industrial del cual provienen. Se destacan en estas características fisicoquímicas tales como salinidad, porcentaje de sólidos, constituyentes orgánicos e inorgánicos, oxígeno disuelto, pH, proporciones de hidrocarburos y de metales pesados [3], [4], [5].

En el caso particular del campo en estudio, el incremento en la producción del agua se ha convertido en una problemática que genera dificultades operacionales al efectuar la disposición final, debido a la ausencia de equipos que permitan el tratamiento de dicha agua. El tratamiento del crudo que se efectúa en el centro operativo El Salto se realiza a través de dos separadores de agua libre (FWKO), seguidos de tres tratadores térmicos; estos equipos se implementan con el fin de llevar a cabo la separación de fases provenientes de la producción de un total de veintisiete pozos activos, y así posteriormente conducir el agua resultante de la separación hacia el pozo inyector de agua para su disposición final. No obstante, no se cuenta con equipos destinados al tratamiento de agua de producción, por lo que la calidad de este fluido inyectado excede los límites establecidos según el Decreto N.º 883 sobre las Normas para el Control de la Calidad de los Cuerpos de Agua y de los Vertidos Líquidos [6], con lo que se supera en gran medida el límite del total de sólidos suspendidos (TSS) de 80 mg/L y el valor de la concentración de aceite en agua (O&W) de 20 mg/L.

La ausencia de un tratamiento al agua ha generado problemas operacionales, como, por ejemplo, la disminución de la tasa de admisión del pozo inyector (producto de obstruc-

ción de la cara de la formación con sólidos suspendidos y aceite en agua), además de pérdidas económicas resultantes de la paralización temporal de la producción de pozos con alto corte de agua, necesaria para efectuar el reacondicionamiento del pozo inyector.

Como una manera de prevenir o mitigar las situaciones planteadas, asociadas a la industria petrolera o en el ámbito del tratamiento del agua en general, se han empezado a considerar nuevas tecnologías, nuevos procesos y, en general, nuevas líneas de tratamiento, así como la modificación de las antiguas [7]. En la actualidad existen soluciones de depuración, sin embargo, se plantean aún optimizaciones —a fin de incrementar la eficacia del proceso— desde el punto de vista económico y medioambiental. Las técnicas de separación tradicionales que permiten hacer frente a la contaminación por hidrocarburos, incluida la separación por gravedad, los dispersantes químicos, la centrifugación y la flotación, siempre han requerido un consumo excesivo de energía, altos costos operativos, instrumentos complejos, contaminación secundaria, etc., lo que ha limitado seriamente su aplicación en la industria [8]. Con el pasar del tiempo se ha estudiado la aplicación de distintos métodos, los cuales van desde tecnologías de fotocatalisis [9], [10], biocoagulación [11], [12], [13], [14], biorremediación mediante microorganismos [15], ozonización [16], o membranas de filtración [17], [18], [19], entre otras.

Asimismo, se emplean técnicas de filtración, entre las que son comunes los filtros gruesos, los cuales contribuyen, principalmente, a la separación de sólidos finos, con lo que se mejora también la calidad microbiológica del agua [20]. También se han desarrollado investigaciones respecto a filtros lentos de arena [21], así como a la aplicación de compuestos convencionales e innovadores para sistemas de lechos de separación, como en el caso del uso de zeolita [22], material KDF en filtros multicapa [23] y materiales filtrantes antimicrobianos a base de carvacrol, eugenol, timol y vanillina para el tratamiento de aguas superficiales [24].

De manera consecuente, también se han estudiado y evaluado materiales vegetales como fuente primaria en el desarrollo de biofiltros para la remoción de agentes orgánicos e inorgánicos. Tal es el caso del aserrín [25], [26], del bagazo de la caña de azúcar como medio de adsorción de petróleo en agua [27], así como de las cáscaras de arroz [28], nuez [29], banana [30], [31], [32] o la mezcla de cáscaras de banana, coco, café molido, corteza de eucalipto, piasava y jacinto de agua para la adsorción de iones de Pb^{2+} y Ni^{2+} presentes en aguas [33].

Si bien las cáscaras de coco constituyen un desecho agroindustrial, a pesar de esto representan una fuente natural de fibra, con una composición promedio del 36 % de celulosa, 25 % de hemicelulosa y 28 % de lignina [34]. Su uso para el tratamiento y la remoción de agentes contaminantes en aguas residuales e industriales tiene un desarrollo significativo en el ámbito científico, del que se destaca una patente que data del 2007 cuya finalidad fue demostrar la eficacia de este subproducto a través del uso

del mesocarpio del coco como material biofiltrante en un sistema de tratamiento de aguas residuales [35]. De igual forma, se destacan investigaciones en las que el carbón activado procedente del endocarpio y mesocarpio de esta materia vegetal se empleó como elemento separador y tratante de dureza, fenoles, fluoruros, hierro, plomo y cromo en muestras de agua [36], [37], [38], [39], [40].

Por tal motivo, en la presente investigación se planteó esta alternativa, específicamente en el área de estudio, de modo que facilitara el control sobre los sedimentos y aceites aún presentes en el agua destinada a inyección. Esto mediante la aplicación de un medio filtrante a base del mesocarpio y endocarpio de las cáscaras de coco (*Cocos nucifera*), a fin de mejorar las condiciones del vertido líquido. Asimismo, con el propósito de reducir los costos de tratamiento, toda vez que en la actualidad no existe un tratamiento al agua producida en el área y que la opción comúnmente empleada en campos petroleros vecinos, por ser importada, resulta costosa. Para esto se caracterizó tanto el agua de producción como la cáscara de coco pulverizada, la cual, posteriormente, se emplearía como medio filtrante. Luego, se evaluó la eficiencia del proceso de filtración mediante el uso del material señalado y, finalmente, se analizaron los costos y los beneficios de la implementación de esta nueva alternativa operacional.

2. METODOLOGÍA

Propiedades físicas y químicas del agua de producción del campo El Salto

El agua de producción se muestreó a la salida del FWKO V-1301 y se caracterizó a través de la determinación del pH por medio del método de prueba estándar para pH de soluciones acuosas con el electrodo de vidrio (ASTM E-70) [41], así como el total de sólidos suspendidos (TSS) y el porcentaje de aceites en agua (O/W) mediante el uso de un espectrofotómetro DR 2800 (método fotométrico 8006-Hach) [42], [43]. Adicionalmente, se determinó la dureza total del agua de procesos a través del método volumétrico (SMWW-2340) [44], y el contenido de calcio y magnesio al aplicar espectrofotometría de absorción atómica (SMWW-3111) [45].

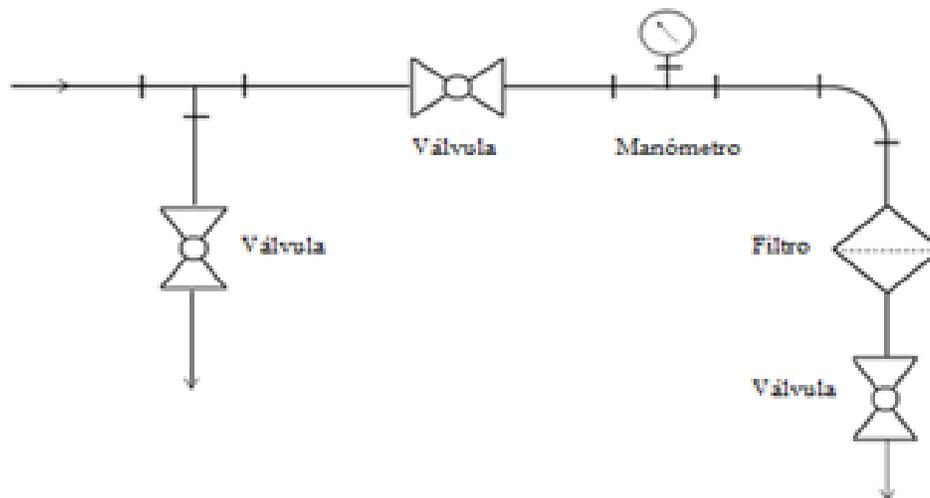
Caracterización de la fibra de coco pulverizada como medio filtrante

Se recolectaron las cáscaras de coco (*Cocos nucifera*) provenientes de la actividad comercial del fruto en el municipio Uraoa, del estado Monagas, al ser estas corazas un subproducto agrícola. A continuación, se procedió a su lavado con agua corriente y secado al sol durante un periodo de veinticuatro horas para eliminar la humedad contenida, seguido de un proceso de trituración (específicamente del endocarpio y el mesocarpio) mediante un mecanismo rudimentario en el que se empleó un mortero casero, y de

molienda a través de un molino tradicional marca Corona. Posteriormente, se obtuvieron distintos tamaños de partículas, las cuales se tamizaron para llevar a cabo una separación entre las partículas de 1, 2 y 3 mm. La caracterización del material triturado para las tres muestras de partículas consistió en la determinación del pH en sólidos por el método estándar (ASTMD4972-95a) [46] y de densidad aparente (ASTM C29/C29M-07) [47]. Las pruebas correspondientes a la determinación de la densidad real mediante el método del picnómetro y de absorción del agua (COVENIN 242:79) [48]; finalmente, la porosidad se estimó a partir de la relación entre las densidades aparente y real.

Montaje experimental

Se construyó un filtro de prueba con tubería PVC (policloruro de vinilo), además de tres válvulas de bola y un manómetro, equipos implementados para mantener un control de la presión de entrada al filtro a 7 lpcm, tal como se indica en la figura 1.

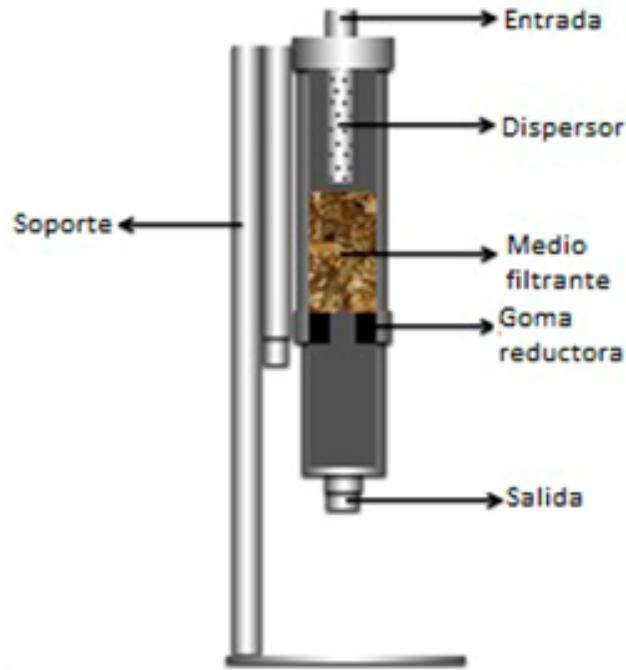


Fuente: elaboración propia.

FIGURA 1. ESQUEMA DE SISTEMA DE FILTRACIÓN EXPERIMENTAL

El filtro contó en su interior con un dispersor, un cartucho de 120 g de material pulverizado (80 % endocarpio y 20 % mesocarpio de cáscaras de coco mezclados de forma homogénea), datos especificados en la figura 2 cuyas medidas fueron 5,08 cm (2 pulgadas) de diámetro y 15 cm de longitud, representando así el 50 % de la capacidad del filtro de prueba. Esta relación de volúmenes es similar a la aplicada actualmente en los filtros banda plateada marca Wemco operados en el campo El Salto. Vale la pena indicar que las proporciones del material empleado diferencian a este proto-

tipo respecto a la invención de Talbot et al. [35], en la cual el material biofiltrante comprende desde un 20 % hasta 80 % en peso de fragmentos de mesocarpio, en combinación con otras biomazas como, por ejemplo, turba.



Fuente: elaboración propia.

FIGURA 2. DESCRIPCIÓN DEL FILTRO EXPERIMENTAL

El filtro se conectó mediante un tubing a la bandeja toma muestra del FWKO V-1301, punto en el cual se tomaron diez muestras de filtrado para cada tamaño de partícula y un ensayo adicional al implementar nuez pecán, la cual es el medio filtrante aplicado actualmente por la empresa. Así, se determinaron los siguientes parámetros durante cada repetición: total de sólidos suspendidos y contenido de aceites en agua mediante el uso del espectrofotómetro DR 2800 [42]. Este opera mediante la transmisión de la luz a través de una muestra de agua, la cual se compara con una solución patrón (xileno) cuya transmitancia es de 100 %, lo que permite establecer una comparación con respecto a los valores originales y llevar a cabo el cálculo de la eficiencia del medio filtrante para los tres tamaños de partículas a través de la siguiente relación:

$$\%Efic. = \left(\frac{\text{parámetro en afluente} - \text{parámetro en efluente}}{\text{parámetro en afluente}} \right) \times 100 \quad (1)$$

Los resultados obtenidos con respecto a la concentración de sólidos suspendidos y aceites en agua para los diferentes medios filtrantes se sometieron a un análisis estadístico utilizando el programa Statgraphics Centurion XVI. De esta manera, se observaron las variaciones entre los diferentes medios filtrantes (cáscaras de coco) y el medio filtrante patrón (cáscara de nuez pecán).

Costos y beneficios asociados a la implementación de la cáscara de coco (*Cocos nucifera*) en el sistema de tratamiento de agua del campo El Salto

Se llevó a cabo una investigación de los costos de la cáscara de coco molida (*Cocos nucifera*) a nivel nacional, lo cual permitió establecer una comparación con respecto a los medios filtrantes a base de cáscara de nuez pecán que ofertan diferentes proveedores internacionales. A fin de comparar se tomó como referencia un factor de conversión de 151,64 Bs/\$ para la fecha 07 de diciembre del 2018. Adicionalmente, se estimó la cantidad de medio filtrante requerido por los filtros banda plateada Wemco, al considerar un factor de pérdida del 1 %, datos requeridos en el propósito de determinar el volumen de recursos y los costos de los diferentes medios filtrantes. La eficacia que presentaron ambos medios para llevar a cabo la remoción de sólidos suspendidos y aceites del agua de procesos se evaluaron en consideración a los márgenes establecidos en el Decreto N.º 883: Normas para la clasificación y el control de la calidad de los cuerpos de agua y vertidos o efluentes líquidos [6].

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

A continuación, en la tabla 1 se presentan los resultados promedios obtenidos a partir de diversas pruebas realizadas a muestras de aguas de procesos provenientes del FWKO V-1301 ubicado en el centro operativo El Salto.

TABLA 1. PROPIEDADES FÍSICO-QUÍMICAS DEL AGUA DE PRODUCCIÓN

Condiciones de campo	
Propiedades	Agua de procesos
TSS (mg/L)	184,25
O/W (mg/L)	217
pH	7,94
Dureza total (mg/L)	8000
Calcio (mg/L)	1115,2
Magnesio (mg/L)	220,3

Fuente: elaboración propia.

Las muestras de agua presentaron una elevada concentración de sólidos suspendidos (TSS) de 184,25 mg/L, lo que supera el límite establecido por el Decreto N.º 883 [6], por el cual se establece un rango máximo de 80 mg/L para su vertimiento o infiltración en el subsuelo, de manera que permanecen estas partículas en suspensión debido a que su densidad es menor o igual a la del agua y al movimiento del líquido. Las muestras de aguas recogidas se compararon con una solución cero (xileno). Esto arrojó como resultado una elevada concentración de sólidos en suspensión, lo que representa mayor grado de turbidez, de modo que se disminuye la calidad del agua.

La concentración de aceite en agua presentó un valor de 217 mg/L. Esto excede el límite establecido de 20 mg/L, e indica que estos aceites presentes en el agua se acumulan de manera progresiva bajo superficie en la cara de la formación receptora afectando su vida operable. La alta concentración de dichas propiedades la ocasiona la falta de un tren de tratamiento de agua que permita adecuar las condiciones de esta para su disposición en la formación.

Estas elevadas concentraciones de sólidos suspendidos y de aceites han generado problemas operacionales ocasionados por la obstrucción de la cara de la formación con material inerte (80,69 %) e hidrocarburos (9,87 %), según los análisis de laboratorio aplicados a una muestra extraída del pozo tanque (figura 3).



Fuente: [49].

FIGURA 3. MUESTRA ENTREGADA DE POZO TANQUE

La alta concentración de contaminantes en las aguas de procesos refleja las causas de los diferentes problemas operacionales presentados, como, por ejemplo, los cierres parciales de los pozos tanque e inyector, debidos a daños significativos en la formación receptora. Esto crea la necesidad de ejecutar labores de acondicionamiento de los tanques a fin de mantener el volumen de agua inyectada. Lo anterior genera pérdidas de producción causadas por el cierre temporal de pozos productores con elevados contenidos de agua y sedimentos, a causa de las limitaciones presentes para disponer el agua asociada al crudo.

En la información relacionada con la caracterización química del agua de procesos del campo el Salto, se reporta un pH de 7,94, lo que expresa que esta propiedad está dentro de los rangos permisibles fijados en el Decreto N.º 883 [6], al estar comprendido entre 6 y 9. La dureza total del agua de procesos posee una concentración de 8000 mg/L que, de acuerdo con la norma COVENIN 2768-91 [50], se puede clasificar como agua muy dura (dureza mayor a 300 mg/L). Vale la pena resaltar que el ion calcio, junto con el de magnesio y el ion hierro (II) determinan la dureza del agua [51]. Así, en el caso de estudio el agua se cataloga como un agua muy dura, y se observa que los parámetros de calcio y magnesio poseen concentraciones de 1115,2 mg/L y 220,3 mg/L, respectivamente. Al compararse con estudios de caracterización del agua [52], los parámetros presentan similitudes en ambos componentes pues son estos de 1332 mg/L para el calcio y 506 mg/L en la concentración de magnesio.

Con relación a la caracterización de aguas de producción, el calcio es uno de los iones que se debe tomar en cuenta, debido a que se combina fácilmente con los iones bicarbonatos o sulfatos. Además, según las condiciones operacionales presentes, puede precipitar como carbonatos o sulfatos generando fuertes incrustaciones. La formación de acumulaciones minerales se lleva a cabo bajo condiciones dinámicas, de manera que entre sus causas se encuentran variaciones de la presión y de la temperatura, presencia de iones no comunes y mezcla de aguas que contienen iones potencialmente incrustantes [53] [54]. Adicionalmente, el magnesio —aunque por lo general está presente en concentraciones menores que el calcio— tiende a coprecipitar y generar así problemas, pues es común encontrar magnesio en incrustaciones de carbonato de calcio [52].

Las principales propiedades de la cáscara de coco (*Cocos nucifera*), como medio filtrante, se presentan en la tabla 2 para cada muestra de partícula.

TABLA 2. PROPIEDADES DE LA CÁSCARA DE COCO (COCOS NUCIFERA)

Propiedades	Granulometría		
	1 mm	2 mm	3 mm
pH	7,16	7,15	7,17
Adsorción (%)	4,8875	4,4702	4,1331
Densidad aparente (g/mL)	0,4985	0,4783	0,4688
Densidad real (g/mL)	1,1421	1,1341	1,1331
Porosidad (%)	56,3503	57,8234	58,6285

Fuente: elaboración propia.

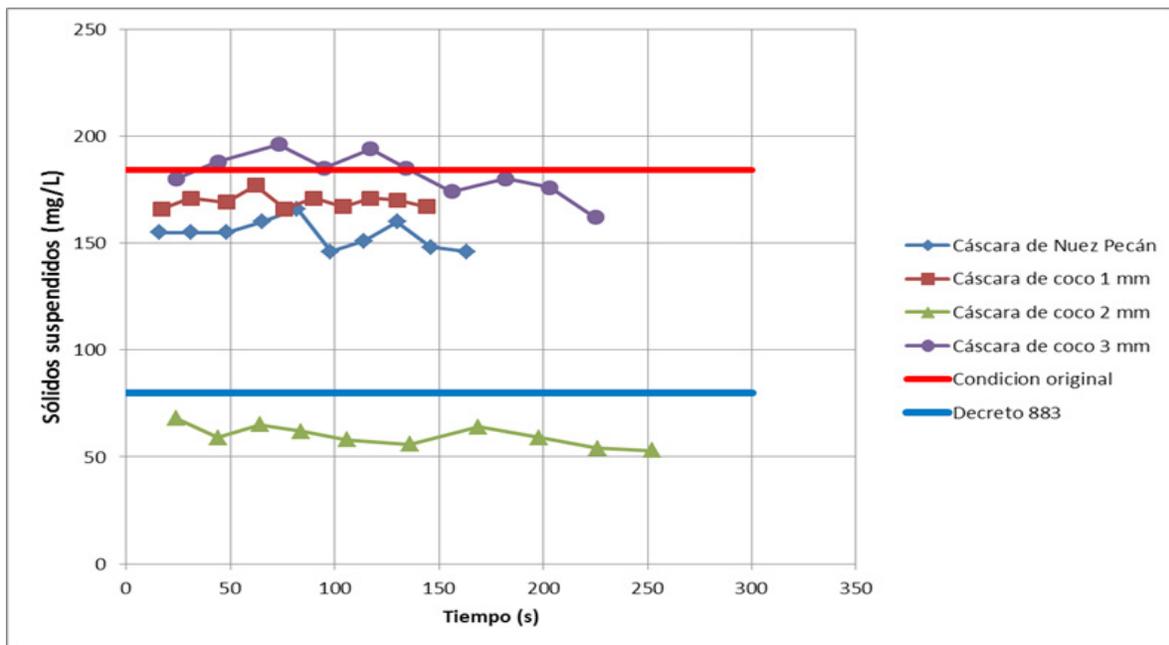
En los resultados obtenidos se observó que el pH de la mezcla comprendida por material filtrante y agua destilada exhibió valores cercanos al pH del agua pura pH=7,0 [55], de manera que se mantiene así un pH relativamente neutral. Respecto al porcentaje de absorción, esta es una propiedad de suma importancia en la práctica porque, a través de su cuantificación, arroja una noción de qué cantidad de agua es capaz de alojar el agregado en su interior [56]. Durante la caracterización del medio filtrante se observa que los resultados obtenidos son considerablemente bajos para los diferentes tamaños de partículas en comparación al porcentaje de absorción de la cáscara de nuez pecán (del 27 al 50 %), de acuerdo con las especificaciones técnicas de Wade Water Treatment Material [57]. Esto indica que solo una pequeña fracción del volumen poroso de las partículas que componen el medio filtrante a base de cáscara de coco puede estar ocupada por fluidos, mostrando así poca capacidad para la acumulación de agua en su interior.

Por otra parte, se obtuvieron valores de densidad real de 1,1421 g/mL, 1,1341 g/mL y 1,1331 g/mL para las partículas de 1 mm, 2 mm, y 3 mm, respectivamente. Dado que la densidad real se define como la densidad de la masa de la muestra sin incluir los espacios porosos [58], esta es una propiedad que al relacionarse con la densidad aparente permite realizar la estimación de la porosidad presente en los diferentes medios filtrantes. Así, entonces, se obtiene en esta investigación, para un tamaño de partícula de 3 mm, un 58,6285 %; para 2 mm, un 57,8234 %; y 56,3503 % para 1 mm. Lo anterior refleja cómo a medida que la granulometría es menor, la forma de las partículas es menos accidentada, de modo que genera un acomodamiento más uniforme y disminuye el tamaño de vacíos entre las partículas.

En comparación con la porosidad de la cáscara de nuez pecán del 47 % [57], el material en estudio presenta mayor porosidad para los tres tamaños de partículas. Sin embargo, se han presentado investigaciones que señalan que medios con valores de densidad aparente grandes y porosidades bajas son muy permeables, mientras que, por el contrario,

medios con valores de densidad aparente pequeños y porosidades grandes son poco permeables [59]. De acuerdo con lo expresado por estos autores se puede inferir que la cáscara de coco podría actuar como un medio poco permeable. No obstante, también en otro estudio se indica que la carbonización del endocarpo de coco permite mejorar los canales de flujo y aumentar el tamaño del poro dentro del material, a fin de convertirlo en un medio con mayor efectividad en el tratamiento de aguas residuales [32], lo cual podría considerarse y comprobarse en próximas investigaciones.

La concentración de sólidos suspendidos del agua de procesos del campo el Salto, antes de efectuarse la aplicación de los diferentes medios filtrantes, era de 184,25 mg/L, mientras que los resultados posteriores a la aplicación del tratamiento experimental se muestran en la figura 4.



Fuente: elaboración propia.

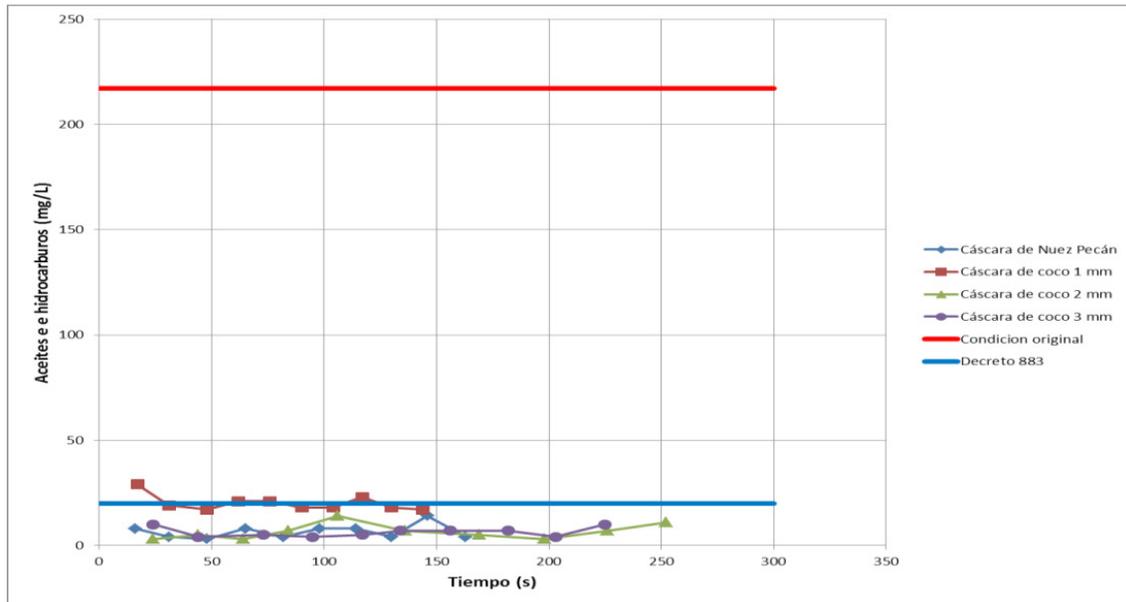
FIGURA 4. VARIACIÓN DE SÓLIDOS SUSPENDIDOS EN EL TIEMPO

Los valores obtenidos exhiben un comportamiento similar en las muestras de filtrado obtenidas durante la aplicación de la cáscara de nuez pecán y cáscara de coco de 1 mm y 3 mm, al ser estas concentraciones superiores al límite de 80 mg/L, fijado en el Decreto N.º 883 [6]. Arrojan, además, resultados satisfactorios durante la aplicación de la granulometría con dimensión de 2 mm, al ser este tamaño el que posee mayor efectividad para remover rastros de partículas sólidas en suspensión presentes en el agua, a medida que esta fluye a través del lecho filtrante. Al contrastar este medio

con el propuesto en un filtro compuesto por grava, carbón activado grueso de cáscara de coco, fréjol blanco, fréjol rojo y carbón activado fino de cáscara de coco [60], se observó que la variación en sus concentraciones de sólidos suspendidos oscilaron entre 536 mg/L y 481 mg/L. Por otra parte, la aplicación de la cáscara de coco de 2 mm (20 % mesocarpio y 80 % endocarpio) permitió efectuar la disminución de este parámetro desde 184,25 mg/L hasta 53 mg/L, lo que mejoró las condiciones del agua de procesos con destino a inyección.

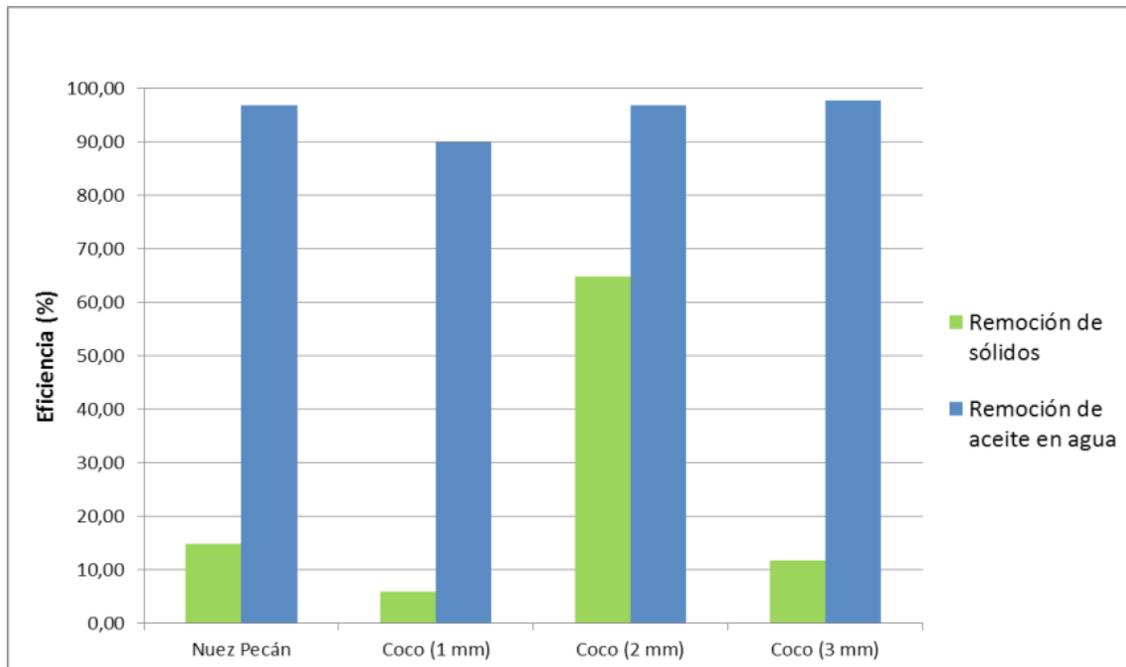
La remoción de aceites en agua se basa en un principio de eliminación, según el cual el crudo se adhiere a las partículas de los diferentes medios filtrantes. Esto da como resultado que al utilizar cáscara de coco de 1 mm se supere de manera relativa el valor permisible de 20 mg/L para llevar a cabo la infiltración en el subsuelo (figura 5). Sin embargo, los restantes lechos filtrantes arrojaron resultados satisfactorios al alcanzar una reducción de 217 mg/L hasta 3 mg/L. Al realizar una comparación entre los resultados obtenidos y los alcanzados a través del uso de zeolita como material filtrante para el tratamiento de aguas residuales [22], con el que se produjo una reducción de los aceites y las grasas desde 672 mg/L hasta 209 mg/L, se puede alegar que la cáscara de coco es una alternativa viable que genera mayor disminución del parámetro estudiado en comparación con el medio contrapuesto. Conforme a la relación de eficacia de tratamiento y tamaño de partículas de la biomasa empleada como medio filtrante, Talbot et al. [35] refieren que la elección del tamaño de partícula modula el nivel de tratamiento alcanzado, en el cual partículas mayores proporcionan niveles de tratamiento menor que las más finas.

Los análisis experimentales demostraron que la aplicación de la cáscara de coco (*Cocos nucifera*), como medio filtrante, en una combinación 20 % mesocarpio y 80 % endocarpio, logró una disminución de la concentración de sólidos suspendidos desde 184,25 mg/L hasta 53 mg/L, lo que representa una eficacia del 68,82 % (para un tamaño de partícula de 2 mm). Esto cumple con lo establecido en el Decreto N.º 883 [6] para llevar a cabo la infiltración de vertidos líquidos al subsuelo, tal como se puede apreciar en la figura 6. Este tamaño de partícula alcanzó, además, una eficiencia del 98,55 % en la remoción de restos de hidrocarburos presentes en el agua destinada a inyección, eficiencia similar a la generada por la cáscara de nuez pecán (del 98,50 %) [57].



Fuente: elaboración propia.

FIGURA 5. VARIACIÓN DE ACEITES EN AGUA EN EL TIEMPO



Fuente: elaboración propia.

FIGURA 6. EFICACIA PARA LA REMOCIÓN DE SÓLIDOS EN SUSPENSIÓN Y ACEITE EN AGUA

Al comparar los resultados de la cantidad de sólidos disueltos removidos (68,82 %) mediante el filtro de prueba, con los obtenidos en la patente de Talbot et al. [35], se evidencia una notable diferencia debido a que dicha invención presentó eficacias que oscilaron entre el 85 % (para un medio solo con mesocarpio), y un 98 % (para un medio solo con parénquima), lo cual puede estar asociado a que en la investigación tomada como referencia no se empleó un medio combinado de mesocarpio y endocarpio. Además, el hecho de hubiera mayor proporción de endocarpio con relación al de mesocarpio (con contenido de parénquima) en el cartucho del prototipo desarrollado, puede haber influido en su estabilidad, toda vez que el mesocarpio suele ser más compresible [35] que las partículas del endocarpio empleadas, lo que genera una menor retención de los sólidos disueltos en el agua cuando transitaban a través del dispositivo.

Al analizarse estadísticamente los resultados obtenidos se observaron variaciones en la concentración de sólidos suspendidos y de aceites en agua para los diferentes tamaños de partículas de coco como medio filtrante y el medio filtrante patrón de cáscara de nuez pecán.

Para el caso de los sólidos suspendidos se estableció una comparación entre el valor-P y el porcentaje de significancia, siendo el resultado (0,0000) de esta comparación menor a 0,05. Esto denota que existe una diferencia estadísticamente significativa entre las medias de las cuatro variables, es decir, el tamaño de partícula de los diferentes medios filtrantes tiene influencia en la concentración de sólidos suspendidos presentes en el agua de procesos. A fin de identificar los grupos formados con base en el parámetro en estudio, se realizó la prueba de múltiples rangos, señalada en la tabla 3, en la cual se han identificado cuatro grupos homogéneos. Asimismo, las diferentes muestras de filtrado presentan diferencias estadísticamente significativas entre sí y con respecto a los valores obtenidos para el medio filtrante a base de cáscara de nuez, aplicado de forma convencional en el tratamiento de agua efectuado en el campo El Salto.

TABLA 3. PRUEBA DE MÚLTIPLES RANGOS. CONCENTRACIÓN DE SÓLIDOS SUSPENDIDOS

	Casos	Media	Grupos homogéneos
Coco 2 mm	10	59,8	X
Pecán	10	154,2	X
Coco 1 mm	10	169,5	X
Coco 3 mm	10	182,0	X

Fuente: elaboración propia.

La aplicación del medio filtrante de cáscara de coco de 2 mm, aunque estadísticamente presentó una diferencia significativa con respecto al medio filtrante comercial, es un resultado satisfactorio ya que cumple con los parámetros establecidos para llevar a cabo la infiltración del agua de procesos en el subsuelo, a diferencia de los resultados obtenidos tras aplicar la cáscara de nuez pecán.

Respecto a la concentración de aceite en agua, se encontró que el tamaño de las partículas que componen los medios filtrantes tuvo una diferencia estadísticamente significativa (valor $P = 0,0000$). Por medio de una prueba de múltiples rangos de la concentración de aceite en agua tras la aplicación de los diferentes medios filtrantes se obtuvieron los resultados que se señalan en la tabla 4.

TABLA 4. PRUEBA DE MÚLTIPLES RANGOS. CONCENTRACIÓN DE ACEITES EN AGUA

	Casos	media	Grupos homogéneos
Coco 3 mm	10	6,3	X
Coco 2 mm	10	6,5	X
Pecán	10	6,5	X
Coco 1 mm	10	20,1	X

Fuente: elaboración propia.

Mediante la prueba se determinó que las medias correspondientes a la cáscara de nuez pecán y cáscara de coco de 2 mm y 3 mm son similares entre sí, así como presentan una considerable eficiencia para la remoción de aceites en agua que permite cumplir con el rango establecido en el Decreto 883 [6]. Es importante implementar un tratamiento eficiente al agua de procesos que se obtiene en las diferentes fases de separación del campo El Salto, a fin de solventar las dificultades suscitadas durante su disposición, debido a que resulta relevante que la problemática generalizada demuestre la importancia de reactivar los procesos de tratamiento, es decir, cumplir con la normativa de calidad de las aguas tratadas [61].

Realizada la comparación de eficiencias para los diferentes tamaños de partículas de cáscara de coco (*Cocos nucifera*), se consideró como granulometría más eficiente la de 2 mm debido a que cumplió con la normativa vigente con un 96 % de eficiencia para la remoción de aceites en agua y un 64 % al remover sólidos suspendidos. Por otra parte, es importante resaltar que el medio filtrante pecán aplicado es un producto importado cuyos costos se expresan en dólares por tonelada; para fines comparativos se consideró un factor de conversión de 151,64 Bs/\$ para la fecha de 07 de diciembre del 2018.

Ahora bien, los filtros banda plateada marca Wenco requieren una cantidad de 6,655 toneladas de medio filtrante, lo cual representa el 50 % de la capacidad del filtro. Para efectos de la investigación se consideró una tasa de desgaste del 1 % anual, asociada al deterioro del material a causa de los lavados o arrastres durante la filtración, ocasionada por la formación de finos (sedimentos). En la tabla 5 se expresan los costos por tonelada de la cáscara de coco molida y de los diferentes proveedores de cáscara de nuez pecán.

TABLA 5. COSTO POR TONELADA DE MATERIALES FILTRANTES

Producto	Fabricante	Costo de materia (\$/ton)	Costo de materia (Bs. S/ton)
Cáscara coco	Producto nacional	-	4,787
Cáscara nuez Pecán	Gongyi Filter Industry Co. Ltd.	325	49,283
	Gongyi City Meiqi Industry & Trade Co. Ltd.	525	79,611
	Ningxia Tengyuan Environmental Protection Materials Sales Co., Ltd.	423	64 143,72
	Wen County Hongtai Water Treatment Materials Factory	368	55 803,52

Fuente: elaboración propia.

La implementación de medios filtrantes de producción nacional constituye una vía para acelerar el tiempo de ejecución de proyectos relacionados con el tratamiento de agua, garantizando así el rápido control y el cumplimiento de los parámetros exigidos para llevar a cabo su disposición como efluente de la industria petrolera. En los últimos años se han desarrollado áreas industriales de gran crecimiento en torno al coco, en las que se destaca su implementación como sustrato. El agua se envasa y el fruto se utiliza para producir biodiésel, por lo que el uso de la cáscara de coco como medio filtrante representaría un medio para la reducción de costos, al mismo tiempo que se acelera la implantación de proyectos de acondicionamiento de aguas. En la tabla 6 se establecen los costos y las eficiencias asociados a los diferentes medios filtrantes a base de cáscara de coco y cáscara de nuez pecán.

TABLA 6. COSTOS Y EFICIENCIAS DE MATERIALES FILTRANTES

Producto	Fabricante	Costo Final (Bs. S)	Eficiencia remoción de aceites (%)	Eficiencia remoción de sólidos (%)
Cáscara de coco	Producto Nacional	63 714,97	96	64
Cáscara de nuez pecán	Gongyi Filter Industry Co. Ltd.	655 956,73	90	95
	Gongyi City Meiqi Industry & Trade Co. Ltd.	1 059 622,41	95	98
	Ningxia Tengyuan Environmental Protection Materials Sales Co., Ltd.	853 752,91	90	92
	Wen County Hongtai Water Treatment Materials Factory	742 744,85	90	85

Fuente: elaboración propia.

En la tabla 6 se refleja que la aplicación del material pulverizado de la cáscara de coco de 2 mm representaría una alternativa competitiva de producción nacional, lo que constituye una reducción de costos hasta del 93,98 % en comparación con medios filtrantes de origen internacional a base de cáscara de nuez pecán. Se destaca la eficiencia del 96 % de esta nueva alternativa para remover aceite, así como su eficacia al remover sólidos suspendidos (aunque resulta menor, con un 64 % con respecto a la cáscara de nuez pecán con 85-98 %). De igual forma, es apto para retirar los sólidos suspendidos del agua de procesos del campo El Salto, cumpliendo con los estándares de calidad del agua fijados en la normativa vigente. También disminuyen los costos asociados al tratamiento, de manera que se convierte en un factor determinante para reducir el número de problemas operacionales.

4. CONCLUSIONES

Al aplicar el medio filtrante a base de la cáscara de coco (*Cocos nucifera*) a nivel de prueba piloto en las aguas de procesos del campo El Salto, se redujo la concentración de aceite en agua por debajo del límite máximo de 20 mg/L establecido en la normativa vigente (Decreto 883), con la aplicación de un tamaño de partícula de 2 y 3 mm. Adicionalmente, la granulometría de 2 mm experimentalmente proporciona la ma-

por remoción de sólidos suspendidos en el agua de procesos, alcanzando así valores por debajo del estándar establecido. Esto la convierte en la más efectiva para efectuar el tratamiento del agua producida, al mismo tiempo que permite una reducción en los costos de tratamiento de hasta 93,98 % en comparación con el medio filtrante convencional empleado en el área. Como sugerencia se plantea efectuar la carbonización del endocarpio y mesocarpio de la cáscara de coco, con la finalidad de permitir una mejor interconexión de los poros, así como variar las proporciones de ellos (mesocarpio y endocarpio) a fin de incrementar la eficacia del proceso de filtración.

REFERENCIAS

- [1] C. Liscano, *Problemas de alta producción de agua y gas*, 2013. Disponible en: <https://es.scribd.com/doc/184073173/4-Problemas-de-alta-produccion-de-agua-y-gas>
- [2] S. Marfisi, & L. Salager, «Deshidratación de crudo», 2015. Disponible en: <https://estrucplan.com.ar/producciones/contenido-tecnico/p-efluentes-liquidos-y-gaseosos/deshidratacion-de-crudo-parte-1/>
- [3] E. Gutiérrez, N. Fernández, L. Herrera, Y. Sepúlveda, & Z. Mármol, «Efecto de la aplicación de ozono sobre la biodegradabilidad de aguas de formación», *Multiciencias*, vol. 2, pp. 50-54, 2002.
- [4] A. García, F. Arreguín, S. Hernández, & D. Lluch, «Impacto ecológico de la industria petrolera en sonda de Campeche, México, tras tres décadas de actividad: una revisión», *Interciencia*, vol. 29, pp. 311-319, 2004.
- [5] H. Ma, & B. Wang, «Electrochemical pilot-scale plant for oil field produced wastewater by M/C/Fe electrodes for injection», *J. Hazardous Materials*, vol. 132, pp. 237-243, 2006.
- [6] Decreto 883, *Normas para la Clasificación y el Control de la Calidad de los Cuerpos de Agua y Vertidos o Efluentes Líquidos*, Caracas, Venezuela, 1995.
- [7] R. Ramalho, *Tratamiento de aguas residuales*. España, 2003.
- [8] Y. Huang, H. Zhan, D. Li, H. Tian, & Ch. Chang, «Tunicate cellulose nanocrystals modified commercial filter paper for efficient oil/water separation», *Journal of Membrane Science*, vol. 591, pp. 1-8, 2019.
- [9] J. Rodríguez *et al.*, «Tecnología solar aplicada a la purificación de agua», *Tecnia*, vol. 20, n.o 1, pp. 55-64, 2010.
- [10] J. Blanco Gálvez, & D. Alarcón Padilla, «Incorporación de la energía solar en las tecnologías del agua: desalación solar para la provisión de agua en zonas remotas», *Tecnia*, vol. 20, n.o 1, pp. 13-44, 2010.

- [11] Y. Caldera *et al.*, «Quitosano como coagulante durante el tratamiento de aguas de producción de petróleo», *Boletín del Centro de Investigaciones Biológicas*, vol. 43, n.o 4, pp. 541-555, 2009.
- [12] J. Álava, «Aplicación de quitosano como biocoagulante en aguas residuales contaminadas con hidrocarburos», *Enfoque UTE*, vol. 6, n.o 3, pp. 52-64, 2015.
- [13] A. Revelo, D. Proaño, & C. Banchón, «Biocoagulación de aguas residuales de industria textilera mediante extractos de *Caesalpinia spinosa*», *Enfoque UTE*, vol. 6, n.o 1, pp. 1-12, 2015.
- [14] C. Banchón, R. Baquerizo, D. Muñoz, & L. Zambrano, «Coagulación natural para la descontaminación de efluentes industriales», *Enfoque UTE*, vol. 7, n.o 4, pp. 111-126, 2016.
- [15] J. García González, D. Peñafiel Heredia, & R. Rodríguez, «Bioremediación de hidrocarburos en aguas residuales con cultivo mixto de microorganismos: caso Lubricadora Puyango», *Enfoque UTE*, vol. 10, n.o 1, pp. 185-196, 2019.
- [16] A. Martins Pinheiro, M. R. Salla, & M. L. Bolanos Rojas, «Tratamiento de aguas residuales provenientes de industria de productos de limpieza y desinfectantes por ozonización convencional y catalítica», *Ingeniare. Revista Chilena de Ingeniería*, vol. 27, n.o 2, pp. 223-235, 2019.
- [17] A. Saxena, B.P. Tripathi, M. Kumar, & V.K. Shahi, «Membrane-based techniques for the separation and purification of proteins: an overview», *Adv. Colloid Interface Sci*, vol. 145, pp. 1-22, 2009.
- [18] Z. Chu, Y. Feng, & S. Seeger, «Oil/water separation with selective superanti wetting/superwetting surface materials», *Angew. Chem. Int. Ed.*, vol. 54, pp. 2328-2338, 2015.
- [19] Q. Ma *et al.*, «Preparation of superhydrophilic and underwater superoleophobic nanofiber-based meshes from waste glass for multifunctional oil/water separation», *Small*, vol. 13, pp. 1-7, 2017.
- [20] M. Wegelin, G. Galvis, & J. Latorre, «La filtración gruesa en el tratamiento de agua de fuentes», Instituto de Investigación y Desarrollo en Agua Potable, Saneamiento Básico y Conservación del Recurso Hídrico (Cinara), Publicación Sandec N.o 4/98 1998.
- [21] L. Madueño, M. Meza, & C. Rashta, «Tratamiento y reuso de aguas grises mediante un filtro lento de arena», *Tecnia*, vol. 28, n.o 1, pp. 81-85, 2018.
- [22] D. Pérez, «Análisis de la zeolita como medio filtrante en el tratamiento de aguas residuales provenientes de la lavadora de autos Ayuda al campesino de la Parroquia La Matriz», trabajo de Grado, Universidad Técnica de Ambato, Ecuador, 2017.
- [23] H. Shaker Majdia, M. Shanshal Jaafarb, & A. M. Abeda, «Using KDF material to improve the performance of multi-layers filters in the reduction of chemical and biological pollu-

- tants in surface water treatment», *South African Journal of Chemical Engineering*, vol. 28, pp. 39-45, 2019.
- [24] N. Peña-Gómez, M. Ruiz-Rico, E. Pérez-Esteve, I. Fernández-Segovia, & J. M. Barat, «Novel antimicrobial filtering materials based on carvacrol, eugenol, thymol and vanillin immobilized on silica microparticles for water treatment», *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, vol. 58, pp. 1-9, 2019.
- [25] J. V. Reyes, «Determinación de la eficiencia del aserrín y la fibra de coco utilizados como empaques para la remoción de contaminantes en biofiltros para el tratamiento de aguas residuales», *Enfoque UTE*, vol. 7, n.º 3, pp. 41-56, 2016.
- [26] L. Semerjian, «Removal of heavy metals (Cu, Pb) from aqueous solutions using pine (*Pinus halepensis*) sawdust: equilibrium, kinetic and thermodynamic studies», *Environmental Technology & Innovation*, vol. 12, pp. 91-103, 2018.
- [27] F. Rincones Poyer, S. Marfisi Valladares, J. Á. Danglad Flores, & V. Salazar Palencia, «Adsorción de hidrocarburos de petróleo en agua mediante una columna empacada con bagazo de caña de azúcar», *Saber, Universidad de Oriente*, vol. 27, n.º 3, pp. 441-453, 2015.
- [28] H. A. Alalwan, M. N. Abbas, Z. N. Abudi, & A. H. Alminshid, «Adsorption of thallium ion (Tl⁺³) from aqueous solutions by rice husk in a fixed-bed column: experiment and prediction of breakthrough curves», *Environmental Technology & Innovation*, vol. 12, pp. 1-13, 2018.
- [29] M. Bayat, A. Alighardashi, & A. Sadeghasadi, «Fixed-bed column and batch reactors performance in removal of diazinon pesticide from aqueous solutions by using walnut shell-modified activated carbon», *Environmental Technology & Innovation*, vol. 12, pp. 148-159, 2018.
- [30] K. V. Mahindrakar, & V. K. Rathod, «Utilization of banana peels for removal of strontium (II) from water», *Environmental Technology & Innovation*, vol. 11, pp. 371-383, 2018.
- [31] V. Subbaiah Munagapatia, V. Yarramuthib, Y. Kima, K. M. Leea, & D-S. Kima, «Removal of anionic dyes (Reactive Black 5 and Congo Red) from aqueous solutions using banana peel powder as an adsorbent», *Ecotoxicology and Environmental Safety*, vol. 148, pp. 601-607, 2018.
- [32] A. García, «Tratamiento de agua contaminada con metales pesados, utilizando como medios filtrantes biorresina intercambiadora de cationes de la cáscara y tallo de guineo y carbón activado de endocarpo de coco», Escuela Especializada de Ingeniería ITCA-Fepade, San Salvador, El Salvador, Informe final de investigación 2018.
- [33] I. K. da Silva Correia *et al.*, «Application of coconut shell, banana peel, spent coffee grounds, eucalyptus bark, piassava (*Attalea funifera*) and water hyacinth (*Eichornia crassipes*) in the adsorption of Pb²⁺ and Ni²⁺ ions in water», *Journal of Environmental Chemical Engineering*, vol. 6, pp. 2319-2334, 2018.

- [34] V. Dhyani, & T. Bhaskar, «A comprehensive review on the pyrolysis of lignocellulosic biomass», *Energy*, vol. 129, 2017.
- [35] P. Talbot *et al.*, «Uso de un material biofiltrante basado en mesocarpio de coco en un sistema de tratamiento de aguas residuales», Patente de utilidad ES 2 285 173 T3, noviembre 16, 2007.
- [36] V. Carrillo, & N. Sánchez, «Elaboración de un filtro a base de carbón activado obtenido del endocarpo de coco con el propósito de reducir la dureza en el agua potable», trabajo de grado, Facultad de Química y Farmacia, Universidad de El Salvador, San Salvador, 2013.
- [37] R. R. Karri, N. S. Jayakumar, & J. N. Sahu, «Modelling of fluidised-bed reactor by differential evolution optimization for phenol removal using coconut shells based activated carbon», *Journal of Molecular Liquids*, vol. 231, pp. 249-262, 2017.
- [38] M. Talat *et al.*, «Effective removal of fluoride from water by coconut husk activated carbon in fixed bed column: experimental and breakthrough curves analysis», *Groundwater for Sustainable Development*, vol. 7, pp. 48-55, 2018.
- [39] E. Yachas Tena, «Grado de eficacia del carbón activado de la cáscara de coco, en la absorción del hierro y plomo del agua de consumos de los estudiantes de la I.E. San Andrés de Paragsha-Simón Bolívar 2018», trabajo de grado, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional Daniel Alcides Carrión, Cerro de Pasco, Perú, 2019.
- [40] L. Chandana, K. Krushnamurthy, D. Suryakala, & Ch. Subrahmanyam, «Low-cost adsorbent derived from the coconut shell for the removal of hexavalent chromium from aqueous medium», *Materials Today: Proceedings*, pp. 1-8. doi: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2019.04.205>, 2019.
- [41] ASTM International, *ASTM E70: Método de prueba estándar para pH de soluciones acuosas con el electrodo de vidrio*. West Conshohocken, PA.: ASTM International, 2015.
- [42] Hach, *Método fotométrico 8006. Procedimiento para la prueba de determinación de sólidos suspendidos*, PA., EE. UU.
- [43] E. Olsen, *Métodos ópticos de análisis*. España: Editorial Reverté, 1990.
- [44] SMWW, Métodos estándar para el examen de agua y aguas residuales, *SMWW-2340. Dureza total a través del método volumétrico*.
- [45] SMWW Métodos estándar para el examen de agua y aguas residuales, *SMWW-3111. Contenido de Calcio y Magnesio. Espectrofotometría de absorción atómica*.
- [46] ASTM International, *ASTM D4972:95a. Método de prueba estándar para pH de sólidos*. West Conshohocken: ASTM International, 1995.

- [47] ASTM International, *ASTM C29/C29M-07. Método de prueba estándar para la densidad aparente*. West Conshohocken: ASTM International, 2007.
- [48] Comisión Venezolana de Normas Industriales, *Norma COVENIN 242:79. Papeles. Método de ensayo para determinar la humedad por secado en estufa*. Caracas: Fondonorma, 1979.
- [49] Petróleos de Venezuela, S.A. (PDVSA). (2017) *Análisis de laboratorio de muestra de pozo tanque*, Empresa Mixta Petrodelta, S.A. Presentación en Power Point.
- [50] Comisión Venezolana de Normas Industriales, *Norma COVENIN 2768:91. Aguas naturales, industriales y residuales. Preparación de muestras para la determinación de metales*. Caracas: Fondonorma, 1991.
- [51] S. Manahan, *Introducción a la química ambiental*. Ciudad de México: Editorial Reverté, 2006.
- [52] J. Otálora, *Water production*, Hawaii, 2012.
- [53] C. Islas, & A. Muñoz, *Evaluación experimental de inhibidores de incrustación*. Ciudad de México, 1977.
- [54] M. Andrei, & F. Gagliardi, «Redissolution studies in bulk and in coreflood for PPCA scales inhibitor», *Journal of Petroleum Science and Engineering*, vol. 43, n.o 1, pp. 35-55, 2004.
- [55] A. Peña, A. Arroyo, A. Gómez, A. Tapa, & R. Gómez, *Bioquímica*, 2ª ed. Ciudad de México: Editorial Limusa, 2004.
- [56] J. Osorio, Y. Pereira, M. Gómez, & R. Manjarrez, *Determinación de la densidad aparente, densidad nominal y la absorción*. Sincelejo, 2012.
- [57] Zhengzhou, «Wade water treatment material», presentación en Power Point, 2018.
- [58] U. Álvarez *et al.*, *Manual de actividades experimentales*, 2ª ed. Ciudad de México: Editorial El Colegio, 2006.
- [59] M. Kutilek, & D. Nielsen, *Caracterización de medios porosos*. Alemania: Editorial GeoEcology, 1994.
- [60] M. Molina, «Elaboración de un filtro artesanal de agua utilizando materiales no convencionales, evaluando su eficiencia para la disminución de los niveles de contaminación de aguas residuales generadas por una lavadora de autos», trabajo de grado, Universidad Técnica de Ambato, Ecuador, 2016.
- [61] R. Campos, *Evaluación de la operación, mantenimiento y mejoramiento de doce plantas de tratamientos de aguas residuales en Guatemala, El Salvador y Honduras*. Costa Rica: Editorial Prodoma, 2005.