

Remoción de turbidez de agua mediante filtración utilizando cáscara de coco (*Cocos nucífera*) a nivel de laboratorio

Tomás Darío Marín-Velásquez*; Dany Day Josefina Arriojas-Tocuyo

Innova Scientific SAC, Área de Investigación. Jirón General Córdova, Jesús María, Lima, Perú

*tmarin@innovascientific.com

Fecha recepción: octubre 29 de 2019

Fecha aceptación: mayo 23 de 2020

Resumen

La turbidez es la medida de la claridad del agua relacionada con el efecto que produce el material suspendido, al disminuir el paso de la luz a través de ella. En la presente investigación se evaluó el efecto de un medio filtrante con base en la cáscara o endocarpio de coco (*Cocos nucífera*), como reductor de la turbidez de agua turbia sintética, formulada con arcilla caolín. Se preparó una solución con 5000 mg/L de caolín en agua y luego se diluyó hasta una turbidez de 100 NTU, la cual se pasó a través de un filtro empacado con la cáscara de coco granulada y se le midieron la turbidez, los sólidos suspendidos totales y el pH. Se utilizaron seis cantidades de cáscara de coco y se analizó la influencia de esta variable sobre los valores de las variables medidas (turbidez, SST y pH). Se aplicó un análisis de regresión para cada una de las variables estudiadas y se obtuvieron los modelos matemáticos que definen el comportamiento de cada una de ellas respecto a la cantidad de cáscara de coco, así como análisis de varianza con $\alpha = 0,05$, usando el paquete estadístico *Statgraphics Centurion XVI.I*. Los resultados indicaron que la cáscara de coco logró remover hasta el 76,4% de la turbidez y 94,8% de los SST, además se obtuvieron modelos matemáticos no lineales, que relacionan la turbidez y SST con la cantidad de medio filtrante, con $R^2 > 0,90$ y estadísticamente significativos con p-valor $< 0,05$ en todos los casos.

Palabras clave: *Cocos Nucífera*; Filtración; Turbidez; Sólidos Suspendidos; Clarificación; Regresión.

Removal of water turbidity by filtration using coconut shells at laboratory level

Abstract

Turbidity is a measure of the clarity of the water, related to the effect of the suspended material in reducing the passage of light through it. In the present investigation, the effect of a coconut shell or endocarp filter media (*Cocos nucifera*) was evaluated as a synthetic turbidity reducer for cloudy water, formulated with kaolin clay. A solution of 5000 mg/L of kaolin was prepared in water and then diluted to a turbidity of 100 NTU, and was passed through a filter packaged with the granulated coconut shell and measured for turbidity, total suspended solids and pH. Six different amounts of coconut shell were evaluated and the influence of this variable on the measured parameters (turbidity, TSS and pH) was analyzed. A regression analysis was applied for each every variable studied and the mathematical models that define the behavior with respect to the amount of coconut shell were obtained, as well as analysis of variance with $\alpha = 0.05$, using the statistical package Statgraphics Centurion XVI.I. Results indicated that the coconut shell managed to remove up to 76.4% of the turbidity and 94.8% of the TSS, in addition nonlinear mathematical models were obtained, which relate the turbidity and TSS with the amount of filter media, with $R^2 > 0.90$ and statistically significant with p-value < 0.05 in all cases.

Keywords: *Cocos Nucifera; Filtration; Turbidity; Suspended Solids; Clarification; Regression.*

Remoção da turvação da água por filtração utilizando cascas de coco ao nível do laboratório

Resumo

Turbidez é uma medida da claridade da água, relacionada ao efeito do material em suspensão em retardar a passagem da luz através dela. Na presente investigação, o efeito de uma casca de coco ou meio filtrante endocarpo (*Cocos nucifera*) foi avaliado como um redutor de turbidez sintética para água turva, formulado com argila caulim. Uma solução de 5000 mg/L de caulim foi preparada em água e depois diluída até uma turbidez de 100 NTU, que foi passada através de um filtro embalado com a casca de coco granulada e medida para turbidez, sólidos totais em suspensão e pH. Foram utilizadas seis quantidades de casca de coco e foi analisada a influência desta variável nos valores das variáveis medidas (turbidez, TSS e pH). Uma análise de regressão foi aplicada para cada uma das variáveis estudadas e foram obtidos os modelos matemáticos que definem o comportamento de cada uma delas em relação à quantidade de casca de coco, bem como a análise de variância com $\alpha = 0,05$, utilizando o pacote estatístico Statgraphics Centurion XVI.I. Os resultados indicaram que a casca do coco conseguiu remover até 76,4% da turbidez e 94,8% do SST, além disso foram obtidos modelos matemáticos não lineares, que relacionam a turbidez e o SST com a quantidade de meios filtrantes, com $R^2 > 0,90$ e estatisticamente significativos com $p < 0,05$ em todos os casos

Palavras-chave: *Cocos nucifera, filtração, turbidez, sólidos em suspensão, clarificação, regressão.*

Introducción

La turbidez se define como la medida de la claridad del agua, y está relacionada con el efecto que produce el material suspendido, el cual disminuye el paso de la luz a través del agua [1]. Los materiales suspendidos, causantes de la turbidez en el agua, incluyen partículas de suelo (arcilla, limo y arena), algas, plancton, microbios y otras sustancias. La turbidez es un parámetro fundamental como indicador de la calidad del agua potable, debido a que cuando se presentan elevados niveles de turbidez, los microorganismos presentes pueden protegerse de los efectos de la desinfección, lo que puede estimular la proliferación de bacterias y aumentar la demanda de cloro utilizado [2]. El método normalizado para la determinación de turbiedad se ha realizado con base a la dispersión de la luz al pasar a través del agua, utilizando un instrumento denominado turbidímetro; el cual está diseñado, en su mayoría, para medir bajos valores de intensidad de luz dispersa en una dirección particular, predominantemente en ángulos rectos de luz incidente [3]. Este método se conoce con el nombre de nefelométrico.

La Organización Mundial de la Salud [4], considera que valores de turbidez mayores a 50 Unidades de turbiedad nefelométrica (NTU) son altas, aunque el mismo organismo considera que no existe ningún valor de referencia basado en efectos sobre la salud para este parámetro. Sin embargo, menciona que la turbidez debe ser menor que 0,1 UNT para lograr una desinfección sea eficaz. Desde el punto de vista de la calidad de cuerpos de agua, una mayor turbidez aumenta la temperatura del agua debido a que las partículas suspendidas absorben más calor, lo que reduce la concentración de oxígeno disuelto (DO), ya que el agua caliente contiene menos DO que el agua fría. Una mayor turbidez también reduce la cantidad de luz que penetra en el agua, lo que disminuye la fotosíntesis y la producción de oxígeno. En el tratamiento para la remoción de la turbidez del agua, se utilizan métodos como la filtración, la cual se refiere a eliminar o separar sólidos en suspensión en el agua, haciéndola pasar a través de un material poroso filtrante, que puede ser de tipo granular, el cual logra la retención de sólidos en el seno o volumen del lecho filtrante mediante adsorción [5]. De la misma manera, los filtros granulares de flujo descendente por gravedad suelen utilizarse para reducir la turbidez (incluidas las sustancias adsorbidas) y los óxidos de hierro y manganeso de

las aguas brutas [4].

Aunque el uso de filtros granulares puede reducir significativamente la turbidez del agua, la reducción de la misma se logra mejor cuando el agua pasa por una serie de métodos de tratamiento químico y físico antes de llegar al filtro, entre los que se encuentran la coagulación, floculación y sedimentación [6]. En los últimos años se han investigado diferentes productos y medios filtrantes de origen vegetal como métodos alternativos para la remoción de la turbidez del agua, los cuales tienen en común la búsqueda de productos con menor impacto ambiental y la reducción del empleo de productos químicos. El uso de productos vegetales como coagulantes y floculantes, se muestran en los trabajos de Sasikala y Muthuraman [7], los cuales utilizaron polvos de *Vigna mungo* y *Zea Mays*, logrando eficiencias de más de 70%. Así mismo, el almidón de plátano fue utilizado como coagulante para disminuir la turbidez del agua, con lo que se demostró su potencial como sustituto de productos químicos [8]. El uso de la filtración para la remoción de turbidez del agua fue estudiado con medios filtrantes como: arena [9], con lo que se logró una eficiencia de 97%; carbón vegetal [10], con el que se llegó a una eficiencia de 86%; y carbón activado [11], con el que se logró más de 75% de eficiencia. La cáscara o endocarpio de *C. nucifera*, ha sido poco utilizada como medio filtrante en estudios a nivel de laboratorio, para observar su aplicabilidad en el tratamiento de agua, observándose que en la mayoría de las investigaciones se utiliza para producir carbón activado y usar el mismo como medio filtrante en el tratamiento de agua [12,13,14]. Entre los usos que se le han dado a la cáscara de coco sin ser convertido en carbón activado, se puede mencionar, como material de empaque en filtro anaeróbico, con el que se logró remover el 79% de DBO en agua [15]. Dada la disponibilidad de este material y la facilidad de convertirlo en medio filtrante granular, se planteó su evaluación para la remoción de la turbidez del agua, en un estudio a nivel de laboratorio, con la finalidad de observar su posible uso en filtros de bajo costo que puedan ser empleados en zonas rurales en las que no se cuenta con agua limpia para consumo. Aunque la filtración por sí sola no logre la potabilización del agua, el uso de un material como la cáscara de coco se evalúa como alternativa combinada con otros métodos para producir agua potable para las comunidades que la requieran.

Metodología

Procesamiento de la cáscara de coco (*Cocos nucifera*)

Para la preparación del material filtrante a partir de la cáscara de coco, se obtuvieron las cáscaras o endocarpios de coco de puestos de ventas en la ciudad de Lima, las cuales fueron procesadas para eliminar los restos de fibra (mesocarpio). Luego, se trituraron en molino de martillo y se tamizaron con malla de 2 mm para asegurar un tamaño uniforme de granos. Se sometió el material filtrante a lavado con agua mediante el método de extracción sólido – líquido (Soxhlet) y se secaron por 24 horas en estufa a 105 °C. Después de la preparación, el material filtrante fue caracterizado para determinar las siguientes propiedades: densidad a través del método descrito en la norma ASTM D854 [16], pH mediante el método establecido en la norma ASTM D4972 [17] utilizando un pH digital portátil Hanna HI 98130 y adsorción de agua y porosidad por gravimetría aplicando el procedimiento descrito por Bazán [18]. Los resultados se observan en la tabla 1.

Tabla 1. Propiedades del medio filtrante a base de cáscara de coco (*Cocos nucifera*).

Propiedades	Valor	Unidad
Densidad	0,5	g ml ⁻¹
pH	5,1	----
Adsorción de agua	35,8	%
Porosidad	55,0	%

Preparación del agua turbia sintética (ATS)

El agua turbia sintética (ATS) fue preparada mezclando 5 g de caolín rosado en 1000 ml

(5000 mg/l) de agua de grifo [19]. Se creó una suspensión mezclando con un agitador magnético de forma continua por una hora para producir la dispersión uniforme del caolín, luego se dejó reposar durante 24 horas para la hidratación de la arcilla. El caolín produce una suspensión estable, por lo que aun cuando no se reproducen las condiciones exactas del agua de las comunidades, presenta una excelente alternativa para la evaluación experimental de la eficiencia de productos coagulantes y filtros, por lo que ha sido utilizada en diversas investigaciones [19, 20, 21]. Al transcurrir el período de hidratación, se procedió a preparar una dilución utilizando agua de grifo con una turbidez de 100 NTU, medida directamente utilizando un Turbidímetro Digital Hanna Instruments Hi93703 portátil. Al agua sintética se le determinó también los SST por el método gravimétrico, de acuerdo al procedimiento descrito en la norma ASTM D5907[22] y el pH aplicando el procedimiento de la norma ASTM D1298[23], utilizando un pH digital portátil Hanna HI 98130, obteniéndose como resultados: 209,9 mg L⁻¹ de SST y pH de 7,56.

Construcción del filtro y desarrollo experimental

Se construyeron tres filtros con tubos de PVC de 5,1 cm de diámetro y 50 cm de longitud. En cada filtro se colocaron tres etapas de medio filtrante con masas iguales, separadas por una malla metálica y dejando un espacio vacío entre cada etapa, como se muestra en la figura 1. Al fabricarse tres filtros de iguales características, cada uno se considera una réplica.

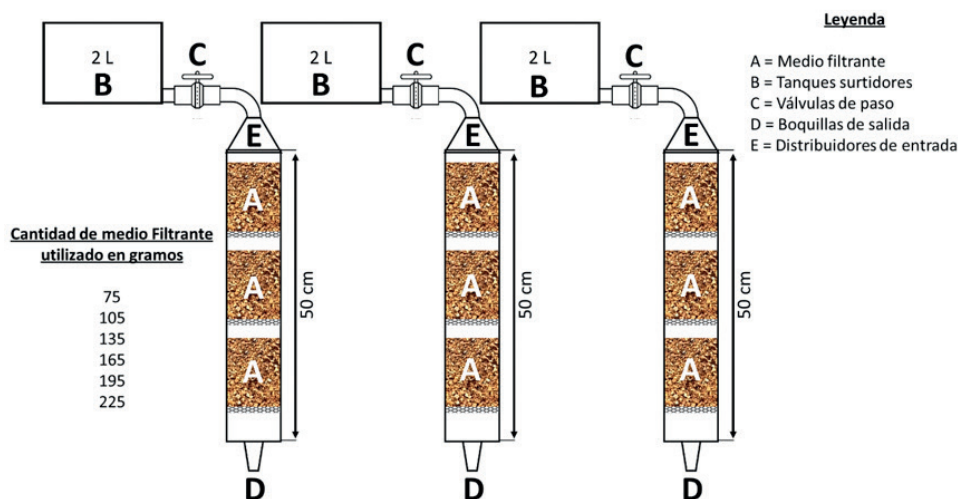


Figura 1. Representación de los filtros construidos.

Inicialmente, se empacaron los filtros con tres unidades de 25 g de cáscara de coco, lo que representó 75 g de medio filtrante granular en cada filtro. Se filtró a través de cada filtro 2 litros de ATS de forma descendente, regulando la velocidad de flujo mediante una válvula de paso instalada a la salida de cada contenedor de ATS acoplado a cada filtro, la cual se fijó en 6,67 ml/s (29,96 m³/h/m²). El agua filtrada se recolectó en jarras plásticas de 2 litros de capacidad y se le determinó la turbidez en NTU, los SST en mg/l y el pH, los cuales fueron las variables dependientes, siendo la cantidad de medio filtrante la variable independiente. Los medios filtrantes se extrajeron, se lavaron con agua destilada y se secaron en estufa por una hora. El proceso de filtrado se repitió, utilizando cinco cantidades de material filtrante para empacar los filtros, lo que representó seis tratamientos. Las cantidades de material filtrante utilizadas se muestran en la figura 1.

Tratamiento estadístico de los datos

Se graficaron cada una de las variables dependientes (Turbidez, SST y pH) respecto a la variable independiente (Masa de medio filtrante), con la finalidad de establecer el modelo matemático de regresión ajustado a cada una, con el cual definir modelos de predicción aplicables al modelo de filtro construido, así como análisis de varianza de cada modelo, para obtener la significancia estadística de cada uno de los modelos obtenidos. Para los análisis estadísticos se utilizó el programa *Statgraphics Centurion XVI.1* y se estableció una significancia de 0,05 (95% de nivel de confianza). También se calculó la eficiencia del filtrado respecto a cada uno de las tres propiedades estudiadas, mediante la ecuación 1.

$$\%Ef = \frac{V_i - V_f}{V_i} \times 100 \quad (1)$$

Dónde: %Ef representa la eficiencia del filtrado, V_i es el valor inicial de la propiedad y V_f es el valor final de la propiedad.

Resultados

En la tabla 2, se muestran los resultados obtenidos luego de la aplicación de los diferentes ensayos, con las diferentes cantidades de material filtrante (Tratamientos), para cada una de las variables dependientes estudiadas.

Tabla 2. Resultados promedio de las propiedades estudiadas respecta a las cantidades de material filtrante.

Tratamiento	SST (mg/l)	Turbidez (NTU)	pH
A	173,8	94,4	7,4
B	116,9	83,1	7,3
C	54,1	63,1	7,2
D	34,8	52,4	7,1
E	16,2	34,1	6,9
F	10,9	23,7	6,8

Se observa que todas las propiedades estudiadas disminuyeron a medida que se aumentó la cantidad de material filtrante. Aun cuando el valor de turbidez no alcanzó el límite establecido en el Reglamento de la Calidad del Agua para Consumo Humano de Perú [24] y la normativa EPA 822-F-18-001[25], que es de 5 NTU, el estudio indica que la cáscara o endocarpio de coco puede ser utilizada para la clarificación de agua y que su eficiencia dependerá de la cantidad que se utilice de la misma. Respecto a los SST y pH, los mismos se mantienen dentro de los rangos establecidos por las normativas, SST < 500 mg L⁻¹ y pH entre 6,5 y 8,5 [25] como se observa en la tabla 3.

Tabla 3. Eficiencias de filtración calculadas para cada una de las propiedades estudiadas.

Tratamiento	SST (%)	Turbidez (%)	pH
A	17,2	5,6	2,3
B	44,3	16,9	4,4
C	74,3	36,9	5,4
D	83,4	47,6	8,2
E	92,3	65,9	8,9
F	94,8	76,4	10,2

Se observa que la mayor eficiencia se obtuvo con el tratamiento F, con máxima eficiencia sobre los SST con 94,8%, en segundo lugar, se obtuvo un 76,35% de eficiencia para la turbidez. El pH aunque disminuyó en 10,2%, se mantuvo dentro del rango neutro (6,5 – 7,4), por lo que se puede decir que esta propiedad no se vio afectada de manera significativa al aplicar los diferentes tratamientos, lo que se fundamenta en su coeficiente de variación el cual fue de 3,1%, valor menos a la significancia fijada en 5%.

En las figuras 2, 3 y 4, se muestran las relaciones entre las propiedades estudiadas y las cantidades de material filtrante utilizadas, con sus respectivas

curvas de regresión a través de análisis de modelo no lineal intrínsecamente lineal.

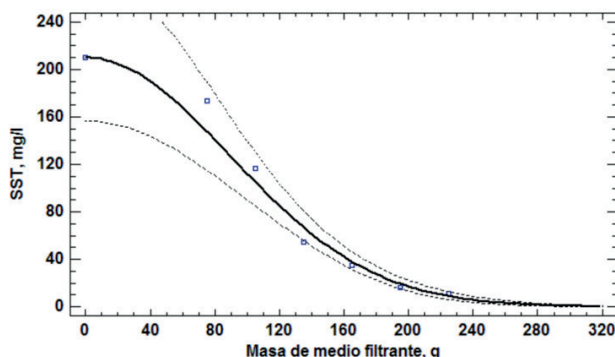


Figura 2. Gráfico de la relación entre los SST y las cantidades de cáscara de coco utilizadas en los tratamientos.

Se observa como los SST disminuyen en mayor cantidad entre los tratamientos A y C con una eficiencia acumulada de 57,1%, lo que contrasta con la disminución de la propiedad al aplicar los últimos tratamientos, para los cuales se acumula 20,5% de disminución. Lo anterior demuestra que la relación entre los SST y las cantidades de material filtrante no es lineal, por lo que se estudiaron modelos no lineales intrínsecamente lineales para definir dicha relación y se escogió el que presentara el mayor coeficiente de determinación, con lo que se obtuvo el siguiente modelo matemático:

$$SST(mg/l) = e^{(5,34759 - 0,000062666 * Masa^2)} \quad (2)$$

El modelo presenta un coeficiente de determinación (R^2) de 0,98, lo que indica que el modelo predice el 98% de la variabilidad de los SST respecto a los tratamientos aplicados, así como un intervalo de confianza de $\pm 0,13968$. Al extrapolar la curva se obtuvo (como se observa en la gráfica) un valor donde la misma se vuelve constante (aproximadamente a los 285 g). Los parámetros estadísticos asociados al modelo se muestran en la tabla 4, donde se muestran los resultados del análisis de varianza.

Tabla 4. Análisis de varianza del modelo matemático de regresión para la relación SST – Masa de material filtrante.

Fuente	Suma de Cuadrados	GI	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
Modelo	7,81017	1	7,81017	225,29	0,0000
Residuo	0,173332	5	0,0346665		
Total (Corr.)	7,9835	6			

El Valor-P de la tabla ANOVA al ser menor a la significancia ($\alpha = 0,05$) indica que el modelo matemático es estadísticamente significativo con un nivel de confianza de 95%, por lo que es aplicable al modelamiento de la relación entre los valores de SST y las cantidades de material filtrante (cáscara de coco) utilizados en la investigación.

A partir del comportamiento de los datos, se analizaron las curvas de tendencia y se escogió la que se muestra en la figura 3 para representar el comportamiento de la turbidez en función de la cantidad de cáscara de coco. Se observó que la disminución de la turbidez es muy regular

al comparar entre cada uno de los tratamientos aplicados, por lo que el modelo no lineal muestra poca variabilidad, con un intervalo de confianza de $\pm 0,16028$, lo que se traduce en un menor intervalo de variación de los datos respecto a la media, mostrada como líneas punteadas; esto si se compara con lo obtenido respecto a la variable SST, donde se observó que las líneas punteadas se alejan más de la curva ajustada. El modelo matemático que define la relación entre la turbidez y las cantidades de cáscara de coco en la investigación se muestra en la ecuación 3.

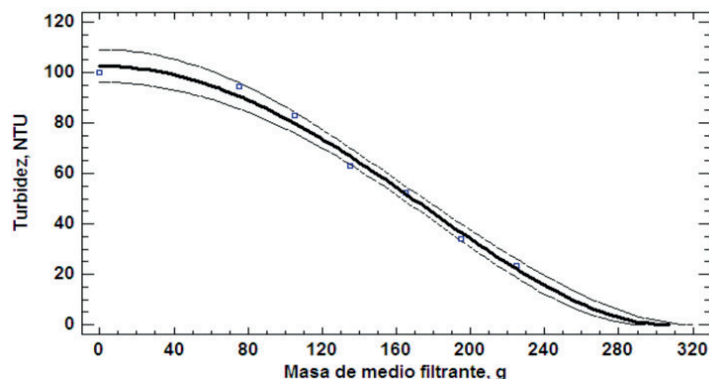


Figura 3. Gráfico de la relación entre la Turbidez y las cantidades de cáscara de coco utilizadas en los tratamientos

El análisis estadístico mostró que el coeficiente de determinación del modelo es $R^2 = 0,99$, lo que indica una predicción de la variabilidad de la Turbidez con la cantidad de medio filtrante de 99%. Al utilizar el modelo matemático obtenido, se puede predecir que con 285 g de material filtrante a base de cáscara de coco, se obtendrá un valor

de turbidez menor al límite establecido en [25], con 2,02 NTU. Lo anterior se observa en la figura 3, al extrapolar la curva pues se observa que la misma se vuelve casi constante a partir de ese valor. El resultado del análisis de varianza del modelo, se observa en la tabla 5.

Tabla 5. Análisis de varianza del modelo matemático de regresión para la relación Turbidez – Masa de material filtrante.

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
Modelo	22,8438	1	22,8438	548,11	0,0000
Residuo	0,208385	5	0,041677		
Total (Corr.)	23,0521	6			

El Valor-P de la tabla ANOVA al ser menor a la significancia ($\alpha = 0,05$) indica que el modelo matemático es estadísticamente significativo con un nivel de confianza de 95%, por lo que es

aplicable al modelamiento de la relación entre la Turbidez y las cantidades de material filtrante (cáscara de coco) utilizados en la investigación.

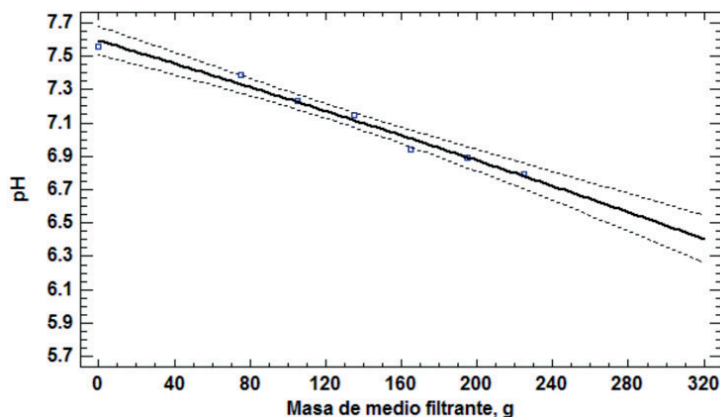


Figura 4. Gráfico de la relación entre la Turbidez y las cantidades de cáscara de coco utilizadas en los tratamientos.

La relación entre el pH y la cantidad de cáscara de coco utilizada se muestra de forma aproximadamente lineal (figura 4), con poca variación, debido a que las curvas de intervalo de confianza (líneas punteadas) están cerca de la curva ajustada. A pesar de la relación inversa obtenida, el pH varió poco, manteniéndose siempre neutra según [26] y dentro en el rango establecido en la norma EPA 822-F-18-001 [25] de 6,5 a 8,5, aun cuando se extrapoló la curva. A pesar de observarse la tendencia lineal, al realizar

el análisis de regresión, se obtuvo la tendencia con más alto coeficiente de determinación, como se muestra en la ecuación 4.

El coeficiente de determinación calculado para el modelo matemático $R^2 = 0,98$, indica que el mismo predice la variabilidad del pH respecto a la cantidad de cáscara de coco utilizada como medio filtrante, en 98%, así mismo se obtuvo un intervalo de confianza de $\pm 0,43049$. En la tabla 6 se muestra el resultado del análisis de varianza realizado para el modelo matemático.

Tabla 6. Análisis de varianza del modelo matemático de regresión para la relación pH – Masa de material filtrante.

Fuente	Suma de Cuadrados	GI	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
Modelo	0,000103611	1	0,000103611	292,97	0,0000
Residuo	0,00000176832	5	3,53664E-7		
Total (Corr.)	0,00010538	6			

Como se observa en la tabla 7, el Valor-P de la tabla ANOVA es menor a la significancia ($\alpha = 0,05$), lo que demuestra que el modelo matemático es estadísticamente significativo con un nivel de confianza de 95%, por lo que es aplicable al modelamiento de la relación entre la pH y las cantidades de material filtrante (cáscara de coco) utilizados en la investigación.

Discusión

Al observar las características del material filtrante a base de cáscara de coco, se tiene que la densidad del mismo es consistente con la reportada en [27], donde se obtuvo un rango entre 0,34 y 0,65 g/cm³, por lo tanto el valor de 0,51 g/cm³ obtenido en la presente investigación se encuentra dentro del rango. En relación a la adsorción de agua, al compararse con otros medios filtrantes como la zeolita la cual reportó un valor de 31,4% [28], se observa que existe coincidencia; así mismo fue reportado un valor de adsorción de agua para el endocarpio de coco de 24% [29], valor menor al que se obtuvo en la presente investigación. De igual manera, se reportó adsorción de agua por endocarpio de coco de 35% [30], valor que coincide con el obtenido. Lo anterior demuestra que se trabajó con un material filtrante con una adsorción de agua mayor a las reportadas por otras investigaciones y que es indicativo de su capacidad para retener agua y además los materiales que se encuentren suspendidas en ella. El pH de la cáscara de coco se considera como ácido [18], lo que coincide con

otros medios filtrantes de origen vegetal, como la harina de tusa de maíz [31]. Por otro lado, al comparar el pH con los reportados para la cáscara de nuez negra (*Juglans regia* L.) y carbón activado [13, 32, 33], se observa que estos medios filtrantes son de características básicas (pH > 7,5), lo que contrasta con el resultado obtenido en la presente investigación. Respecto a la porosidad del medio filtrante, su valor se considera alto, ya que el mismo supera la porosidad del arreglo cúbico de granos esféricos considerado el arreglo de máxima porosidad teórica que es de 47,6% [34,35], valor mayor al reportado para arena fina y grava, que fueron de 41,4 y 41,9% respectivamente [36]. Lo anterior indica que se tiene un medio filtrante con alta capacidad de contención de líquido y que además es muy permeable [37], por lo que deja pasar el agua con facilidad, afirmación que se sustenta con la velocidad de flujo obtenida de 29,96 m³ h⁻¹ m⁻², lo que clasifica al filtro como de flujo rápido descendente [38].

El estudio de la clarificación del agua utilizando un medio filtrante granular de cáscara de coco, medida en función a la remoción de la turbidez y los SST, mostró la factibilidad de este material filtrante para el tratamiento de agua en un filtro rápido de flujo descendente. Se logró la remoción efectiva de ambos parámetros, esto indica que la cáscara de coco es capaz de retener las partículas suspendidas en el agua (SST), disminuyendo a su vez la turbidez, debido a que existe una relación entre estos dos parámetros de calidad del agua. La relación entre los SST y la turbidez ha sido estudiada previamente [39, 40], observando siempre una

relación lineal directamente proporcional entre los parámetros, con la obtención de coeficientes de determinación entre 0,92 y 0,97 [40]. Aunque no estaba entre los objetivos de la investigación, un estudio de regresión entre los SST y la turbidez arrojó un coeficiente de determinación de 0,91 de 0,91, que aunque es menor al rango reportado por los autores anteriormente citados, demuestra que existe una relación directa y lineal entre ambos. Como se muestra en las figuras 2, 3 y 4, se observó una tendencia inversa entre los tres parámetros estudiados y las cantidades de cáscara de coco utilizadas. En los tres casos, las relaciones obtenidas fueron no lineales, intrínsecamente lineales con coeficientes de determinación altos ($>0,90$), lo que indica que la correlación entre las variables fue muy fuerte [41]. Además, todos los modelos obtenidos fueron estadísticamente significativos con un nivel de confianza de 95%, por lo que se puede decir que modelan el comportamiento de las variables respecto a la cantidad de cáscara de coco utilizada, por lo que es factible establecer el nivel de eficiencia respecto a cada parámetro mediante los modelos matemáticos obtenidos.

La disminución de la cantidad de SST después del filtrado, respecto a la cantidad de medio filtrante también fue observada para otros materiales como la tusa de maíz [31] y la cascarilla de *Ricinus communis* [42], lo que coincide con los resultados obtenidos en la presente investigación. Sin embargo, en las investigaciones citadas no se estudiaron los modelos matemáticos respectivos, así mismo la investigación citada reportó una eficiencia de remoción de SST máxima de 84,8%, valor superado en la presente investigación, donde se obtuvo un valor máximo de 94,8%. De igual manera se reportó un porcentaje de remoción de SST de 50% utilizando un biofiltro con conchas marinas como material de soporte [43], que también fue superado en la presente investigación. La relación no lineal inversa entre la turbidez y la cantidad de medio filtrante fue descrita también para un filtro de arena fina [44], en donde se observó que el comportamiento coincide con lo obtenido en la presente investigación a pesar de la diferencia en los medios filtrantes. En investigaciones con diferentes medios filtrantes como carbón activado y arena [13], se reportaron eficiencias de remoción de turbidez menores a 25%, lo cual contrasta con el valor máximo de 76,4% obtenido en la presente investigación. Por otro lado, el uso de medio filtrante granular a base de piedra caliza [45],

mostró eficiencias de remoción de turbidez entre 74,6 y 92,1%, rango que coincide con el valor máximo obtenido. Para el caso del pH, el mismo se mantuvo dentro de un rango neutro, a pesar de observarse una disminución en el mismo al aumentar la cantidad de cáscara de coco, lo que se observa en la tendencia lineal inversa obtenida (ecuación 4), que está acorde con el rango entre 6 y 7 recomendado para procesos de filtración [46], además de presentar un porcentaje de disminución bajo de 10,2%, comparado con los obtenidos para los otros parámetros estudiados, lo que indica que el pH no es afectado en gran medida por el aumento del medio filtrante, aun cuando su disminución se debe a las características ácidas del mismo y se predice que se mantendrá dentro del rango óptimo incluso cuando se aumente la cantidad de cáscara de coco necesaria para que el agua cumpla con el valor requerido de turbidez, la cual es de 285 g con el que se estima un pH de 6,6.

Conclusiones

El endocarpio o cáscara de *C. nucifera* demostró buenas propiedades para la remoción de turbidez en la muestra de ATS utilizada en la investigación como medio filtrante granular, ya que alcanzó una eficiencia máxima de 76,4% para una masa del medio filtrante de 225 g y una alta eficiencia de remoción de SST de 94,8%. En cuanto al efecto del medio filtrante sobre el pH del ATS, se concluyó que a pesar de observarse una disminución, el mismo se encuentra dentro del rango establecido en las normas de calidad de agua.

Se concluye que, según las condiciones de la investigación, las propiedades turbidez, SST y pH disminuyeron con tendencias no lineales, que permitieron establecer los modelos matemáticos que rigen el comportamiento del filtro granular de flujo rápido construido, y se estimó que la turbidez alcanza valores dentro de los rangos establecidos por las normas con una masa de 285 g. Específicamente para la relación entre la turbidez y la cantidad de medio filtrante, el modelo matemático fue Raíz cuadrada en Y - Cuadrado en X, con un intervalo de confianza de $\pm 0,16028$ y un $R^2 = 0,98$. La relación entre los SST y la masa de medio filtrante mostró un comportamiento de una función Log Y - Cuadrado X, con intervalo de confianza de $\pm 0,13968$ y $R^2 = 0,99$. Entre el pH y la cantidad de medio filtrante se evidenció una relación lineal inversa con intervalo de confianza de $\pm 0,03155$ y $R^2 = 0,98$. Lo anterior evidenció

una muy fuerte correlación entre las variables respuesta y la variable independiente.

Se recomienda continuar investigando el uso del endocarpio de *C. nucifera* como medio filtrante granular, utilizando agua turbia proveniente de fuentes naturales y determinando otros parámetros como DBO, coliformes fecales, etc. Así como se debe trabajar con mayores masas de medio filtrante para corroborar las predicciones dadas por los modelos matemáticos obtenidos.

Referencias bibliográficas

- [1] United States Environmental Protection Agency. Water: Monitoring & Assessment. Ohio, Estados Unidos. Disponible en <https://archive.epa.gov/water/archive/web/html/vms55.html>. Acceso el 12 de agosto de 2019.
- [2] Marcó L, Azario R, Metzler C, García MDC. La turbidez como indicador básico de calidad de aguas potabilizadas a partir de fuentes superficiales. Propuestas a propósito del estudio del sistema de potabilización y distribución en la ciudad de Concepción del Uruguay (Entre Ríos, Argentina). Higiene y Sanidad Ambiental. 2004;4:72-82.
- [3] Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales. Turbiedad por nefelometría (método B). Bogotá, Colombia; 2017.
- [4] Organización Mundial de la Salud. Guías para la calidad del agua potable. Primer apéndice a la tercera edición. Volumen 1. Recomendaciones. Genève, Suiza; 2006.
- [5] Universidad de la Coruña. Filtración en medio granular. Serie: Tratamientos terciarios. La Coruña, España; 2014.
- [6] Satterfield, Z. Turbidity Control. The National Environmental Services Center at West Virginia University. Morgantown, USA; 2006.
- [7] Sasikala S, Muthuraman, G. Turbidity removal from surface water by natural coagulants and its potential application. Iran. J. Energy Environ. 2017;8(1):61-66.
- [8] Trujillo D, Duque LF, Arcila JF, Rincón A, Pacheco S, Herrera OF. Remoción de turbiedad en agua de una fuente natural mediante coagulación/floculación usando almidón de plátano. rev. ion. 2014;27(1):17-34.
- [9] Mahvi AH, Sheikhi R, Naddafi K. Total Coliforms and Turbidity Removal of Water in the Continuous Sand Filter. Iran. J. Public Health. 2003;32(3):7-13.
- [10] Nkwonta OI, Olufayo OA, Ochieng GM, Adeyemo JA, Otieno FAO. Turbidity removal: Gravel and charcoal as roughing filtration media. S. Afr. J. Sci. 2010;106(12):1-5.
- [11] Torres-Lozada P, Amezcua-Marroquín CP, Agudelo-Martínez KD, Ortiz-Benítez N, Martínez-Ducuara DS. Evaluation of turbidity and dissolved organic matter removal through double filtration technology with activated carbon. Dyna. 2018;85(205):234-239.
- [12] Onwuka IM, Madubuike CN, Chilakpu, KO. Effectiveness of Coconut Shell Activated Carbon Filter Material Produced Under Various Carbonization and Activation Conditions. IJASRE. 2018;4(6):68-75.
- [13] Ratnoji SS, Singh N. A study of coconut shell - activated carbon for filtration and its comparison with sand filtration. Int. j. renew. energy environ. eng. 2014;2(3):201-204.
- [14] Pradeep GG, Sukumaran KP, George G, Muhammad F, Mathew N. Removal of Dissolved Solids in Waste Water using Activated Carbon from Coconut Shell. Journal for Research. 2016;2(7):5-7.
- [15] De Oliveira LM, Stefanutti R, Filho BC, Tonetti AL. Coconut shells as filling material for anaerobic filters. SpringerPlus. 2013;2:655-661.
- [16] American Society for Testing and Materials. Standard Test Methods for Specific Gravity of Soil Solids by Water Pycnometer (ASTM D854). West Conshohocken, USA; 2014.
- [17] American Society for Testing and Materials. Standard Test Method for pH of Soils (ASTM D4972). West Conshohocken, USA; 2013.
- [18] Bazán R. Manual de procedimientos de los análisis de suelos y agua con fines de riego. Ministerio de agricultura y riego, Lima, Perú; 2017.
- [19] Carrasquero SJ, Montiel S, Farías D, Parra PM, Marín JC, Díaz AR. Efectividad de coagulantes obtenidos de residuos de papa (*Sonalum tuberosum*) y plátano (*Musa paradisiaca*) en la clarificación de aguas. Rev. Fac. Cienc. Básicas. 2017;13(2):90-99.
- [20] Carrasquero S, Martínez MF, Castro MG, López Y, Díaz A, Colina G. Remoción de turbidez usando semillas de *Tamarindus indica* como coagulante en la potabilización de aguas. Rev. bases de la Cienc. 2019;4(1):19-44.
- [21] Mas M, Martínez D, Carrasquero S, Rincón A, Vargas L. Eficiencia de las semillas de *Hymenaea courbaril* como coagulante natural

- en el proceso de clarificación del agua. *Redieluz*. 2012;2(2):123-128.
- [22] American Society for Testing and Materials. Standard Test Methods for Filterable Matter (Total Dissolved Solids) and Nonfilterable Matter (Total Suspended Solids) in Water (ASTM D5907). West Conshohocken, USA; 2013.
- [23] American Society for Testing and Materials. Standard Test Method for Density, Relative Density, or API Gravity of Crude Petroleum and Liquid Petroleum Products by Hydrometer Method (ASTM D1298). West Conshohocken, USA; 2012.
- [24] Ministerio de Salud. Reglamento de la Calidad del Agua para Consumo Humano (DS N° 031-2010-SA). Lima, Perú; 2011.
- [25] Environmental Protection Agency. Edition of the Drinking Water Standards and Health Advisories Tables (EPA 822-F-18-001). Washington, USA; 2018.
- [26] Asociación Española de Fabricantes de Agronutrientes. Clasificación del pH. Valencia, España. Disponible en <https://aefa-agronutrientes.org/glosario-de-terminos-utiles-en-agronutricion/clasificacion-del-ph>. Acceso el 14 de agosto de 2019.
- [27] Bello SA, Agunsoye JO, Adebisi JA, Kolawole FO, Hassan SB. Physical properties of coconut shell nanoparticles. *KUSET*. 2016;12(1):63-79.
- [28] Carbotecnia, Medios Granulares. Zeolita natural. Jalisco, México. Disponible en <https://www.carbotecnia.info/PDF/medfiltrantes/Zeolita.pdf>. Acceso el 17 de agosto de 2019].
- [29] Gunasekaran K, Kumar PS, Lakshmipathy M. Mechanical and bond properties of coconut shell concrete. *Constr. Build. Mater*. 2011;25(1):92-98.
- [30] Bhaskar J, Singh VK. Water Absorption and Compressive Properties of Coconut Shell Particle Reinforced-Epoxy Composite. *J. Mater. Environ. Sci*. 2013;4(1):113-118.
- [31] Marín T, Villarroel W. Evaluación de un filtro a base de harina de tusa de maíz (*Zea mays*) y carbón) y carbón vegetal para el tratamiento de agua contaminada con petróleo. *Geominas*. 2016;44(70):91-96.
- [32] Romero-Arenas O, López R, Damián MA, Hernández I, Parraguirre JF, Huerta M. Evaluación del residuo de cáscara de nuez (*Juglans regia* L.) en la producción de plántulas de *Pinus patula*, en vivero. *Agron. Costarric*. 2012;36(2):103-110.
- [33] Hernández-Rodríguez M, Otero-Calvis A, Falcón-Hernández J, Yperman Y. Características fisicoquímicas del carbón activado de conchas de coco modificado con HNO₃. *Rev. Cubana Quim*. 2017;29(1):26-38.
- [34] Amyx JW, Bass JDM, Whiting RL. Petroleum reservoir engineering. New York: McGraw-Hill; 1960.
- [35] Dugan B. Data report: porosity and pore size characteristics of sediments from Site C0002 of the Nankai Trough determined by mercury injection. En: Proceedings of the Integrated Ocean Drilling Program, Volume 338. Strasser M, Dugan B, Kanagawa K, Moore GF, Toczko S, Maeda L, Editores. Houston: Yokohama (Integrated Ocean Drilling Program); 2015. p. 1-8.
- [36] Mendoza G, Pinilla FA, Martínez F. Evaluación de filtros de arena y de malla para riego por goteo. *Ing. Invest*. 1989;9:52-62.
- [37] Angelone S, Garibay MT, Cauhapé M. Geología y Geotecnia. Permeabilidad de suelos. Rosario, Argentina: Universidad Nacional de Rosario; 2006.
- [38] Pérez JA, Espigares M. Estudio Sanitario del Agua. Filtración. España: Universidad de Granada; 1995.
- [39] Al-Yaseri I, Morgan S, Retzlaff W. Using Turbidity to Determine Total Suspended Solids in Storm-Water Runoff from Green Roofs. *J. Environ. Sci*. 2013;139(6):822-828.
- [40] Hannouche A, Chebbo G, Ruban G, Tassin B, Lemaire BJ, Joannis C. Relationship between turbidity and total suspended solids concentration within a combined sewer system. *Water Sci. Technol*. 2011;64(12):2445-2452.
- [41] Hopkins W. A New View of Statistics. Disponible en <https://complementarytraining.net/free-will-hopkins-a-new-view-of-statistics-pdf-printout/>. Acceso el 12 de septiembre de 2019.
- [42] Marín-Velásquez TD, Heredia-Jiménez VI, Alcarraz-Curi M. Filtro de cascarilla de *Ricinus communis* y carbón vegetal para tratamiento de agua contaminada con hidrocarburos: diseño de un sistema en serie por etapas. *Ing. agua*. 2019;23(3):187-198.
- [43] Galindo A, Toncel E, Rincón N. Evaluación de un filtro biológico como unidad de post-tratamiento de aguas residuales utilizando conchas marinas como material de soporte. *rev. ion*. 2016;29(2):39-50.
- [44] Mahanna H, Fouad M, Radwan K, Elgamal H. Predicting of Effluent Turbidity from Deep Bed

Sand Filters Used in Water Treatment. IJSER. 2015;6(9):621-626.

- [45] Maung UHT. A study on the performance of limestone roughing filter for the removal of turbidity, suspended solids, biochemical oxygen demand and coliform organisms using wastewater from the inlet of domestic wastewater oxidation pond (tesis de maestría)

Malasia: Universiti Sains Malaysia; 2006.

- [46] United States Environmental Protection Agency. Drinking Water Treatability Database. Conventional Treatment. Ohio, Estados Unidos. Disponible en <https://iaspub.epa.gov/tdb/pages/treatment/treatmentOverview.do?reatmentProcessId=1934681921>. Acceso el 22 de agosto de 2019.