

Aplicación del cardón *Stenocereus griseus* (Haw.) Buxb. (*Caryophyllales, Cactaceae*) en la clarificación de aguas con alta turbidez

Application of the cactus *Stenocereus griseus* (Haw.) Buxb. (*Caryophyllales, Cactaceae*) in the clarification of waters with high turbidity

Lorena Fuentes^{1*}, Iván Mendoza², Alicia González³, Zolange Rodríguez⁴ & Karen Valera⁵

¹Universidad del Zulia, Núcleo Costa Oriental del Lago, Laboratorio de Investigaciones Ambientales (Cabimas, Venezuela). Profesora Emérita.

²Profesor Emérito. ivnmendoza@gmail.com.

³Tesista. alix21_6@hotmail.com.

⁴Tesista. zolange_r@hotmail.com.

⁵Tesista. karen_eliza71@hotmail.com.

Recibido 2 de mayo 2019; recibido en forma revisada 26 de mayo 2019, aceptado 1 de junio 2019
Disponible en línea 26 de junio 2019

Resumen

Stenocereus griseus es una cactácea que ha resultado efectiva como coagulante en la clarificación de aguas con turbiedades bajas (20 UNT-100 UNT) y muy altas (200 UNT-300 UNT). El objetivo de esta investigación fue evaluar la efectividad del mucilago crudo extraído de *S. griseus* en la clarificación de aguas con alta turbidez (100 UNT-200 UNT). Los ensayos se realizaron a escala laboratorio. Se prepararon aguas sintéticas ajustadas a turbiedades entre 100 UNT y 200 UNT, las cuales fueron tratadas con diferentes dosis de *S. griseus* y caracterizadas fisicoquímicamente (turbidez, pH, color y alcalinidad). La simulación del proceso de clarificación arrojó remociones de turbidez que oscilaron entre 83,77 % y 91,78 % antes de filtrar y entre 94,68 % y 97,94 % luego de ello. Posterior a la etapa de filtración, el pH se ubicó en el rango de 6,23-6,98, la alcalinidad presentó valores inferiores a 40 mg CaCO₃/L y el color varió desde 13,33 UC Pt/Co hasta 26,67 UC Pt/Co. Estos resultados demuestran la efectividad del coagulante extraído de *S. griseus* para la remoción de turbidez y color en aguas con alta turbidez, pudiéndose utilizar como coagulante primario.

Palabras clave: coagulación-floculación, coagulante natural, clarificación del agua, *Stenocereus griseus*.

Abstract

Stenocereus griseus is a cactus that has been effective as a coagulant in the clarification of waters with low turbidity (20 UNT-100 UNT) and very high (200 UNT-300 UNT). The objective of this investigation was to evaluate the effectiveness of the crude mucilage extracted from *S. griseus* in the clarification of waters with high turbidity (100 UNT-200 UNT). The tests were performed on a laboratory scale. Synthetic waters adjusted to turbidity between 100 NTU and 200 NTU were prepared, which were treated with different doses of *S. griseus* and characterized physicochemically (turbidity, pH, color and alkalinity). The simulation of the clarification process showed turbidity removals that oscillated between 83.77% and 91.78% before filtering and between 94.68% and 97.94% afterwards. After the filtration stage, the pH was in the range of 6.23-6.98, the alkalinity presented values lower than 40 mg CaCO₃ / L and the color varied from 13.33 UC Pt / Co to 26.67 UC Pt / Co. These results demonstrate the effectiveness of the coagulant extracted from *S. griseus* for the removal of turbidity and color in waters with high turbidity, being able to use as a primary coagulant.

Key words: coagulation-flocculation, natural coagulant, water clarification, *Stenocereus griseus*.

* Correspondencia del autor:
E-mail: lfuentesp89@gmail.com



Introducción

El tratamiento del agua puede subdividirse en cuatro etapas: clarificación, desinfección, acondicionamiento químico y acondicionamiento organoléptico. En este estudio se aborda la clarificación, la cual consiste en la eliminación de partículas finas que confieren al agua turbidez y color; a su vez, ésta comprende las fases de coagulación, floculación, sedimentación y filtración. La coagulación contempla la desestabilización eléctrica de las partículas en suspensión (coloides) mediante la adición de sustancias químicas o agentes coagulantes que neutralizan la carga eléctrica de los coloides, los cuales después de una rápida agitación se aglomeran y floculan; esta operación se favorece con una agitación lenta a fin de provocar la aglomeración de las partículas en coágulos de mayor tamaño que posteriormente sedimentan y son fáciles de remover (Arancibia, 2011).

Convencionalmente, el agua destinada al consumo humano se trata con coagulantes de origen químico como $Al_2(SO_4)_3 \cdot 14H_2O$, $FeSO_4 \cdot 7H_2O$ (Romero, 2005), $FeCl_3 \cdot 6H_2O$ y $Fe_2(SO_4)_3 \cdot 9 H_2O$ (Barrenechea *et al.*, 2004), entre otros productos. No obstante, existe una diatriba científica sobre las posibles implicaciones que tendrían para la salud el uso de sales de aluminio para potabilizar el agua, pues en algunas investigaciones se refiere que existe una relación entre el aluminio y el mal de Alzheimer. De hecho, el aluminio es una neurotoxina que inhibe más de 200 funciones biológicas, puede inducir la formación de estructuras neurofibrilares y sus niveles están elevados en cerebros con mal de Alzheimer (Campdelacru, 2012). De allí que su concentración debe ser controlada cuando se utiliza para el tratamiento del agua.

En función de lo expuesto, se hace necesario hallar alternativas factibles para la clarificación del agua que permitan reducir la turbidez y el color a niveles permisibles, tal y como lo establece la normativa venezolana (Gaceta Oficial de Venezuela, 1998), sin dejar un residual de aluminio u ocasionar algún efecto negativo en la salud humana.

En los últimos años se han evaluado algunos productos naturales con propiedades coagulantes que resultan eficientes, seguros, económicos y generan menor cantidad de lodos (Fuentes *et al.*, 2016). El origen de estos productos naturales puede ser vegetal o animal. Entre los coagulantes de origen vegetal se encuentran los cotiledones de semillas de *Moringa oleifera* (Fuentes *et al.*, 2016; Ali *et al.*, 2010; Pereira *et al.*, 2017; Meza-Leones *et al.*, 2018), *Tamarindus indica* (Hernández *et al.*, 2013), *Linum usitatissimum* (López *et al.*, 2014); cactáceas como *Opuntia ficus indica* (González *et al.*, 2009; Fuentes *et al.*, 2016; Olivero *et al.*, 2013), *Opuntia cochinellifera* (Fuentes *et al.*, 2012), *Opuntia wentiana* (Parra *et al.*, 2011), *Hylocereus lemairei* (Mendoza *et al.*, 2008), *Stenocereus griseus* (Fuentes *et al.*, 2011; González *et al.*, 2016), exudados gomosos de *Samanea saman* (González *et al.*, 2006) y de *Cedrela odorata* (Mejías

et al., 2010), algas marinas (Fuentes *et al.*, 2016). Entre los coagulantes de origen animal se han evaluado las gelatinas de huesos bovinos (Fuentes *et al.*, 2014; Briceño *et al.*, 2014), el quitosano (Arancibia, 2011; Fuentes *et al.*, 2008; Caldera *et al.*, 2017) y la quitina (Fuentes *et al.*, 2017).

Las plantas pertenecientes a la familia cactaceae se caracterizan por sintetizar mucilagos, los cuales son polisacáridos tipo pectina, altamente viscosos y con una elevada capacidad para retener el agua, esta propiedad parece estar relacionada con la presencia de ácidos galacturónicos como componente de su esqueleto o cadena principal. Específicamente, el género *Stenocereus* comprende un grupo heterogéneo de cactus distribuidos desde el sur de Arizona hasta el norte de Colombia y Venezuela, se agrupa casi exclusivamente en una sola familia (*Cactaceae*), es un cactus columnar que puede alcanzar los 11 metros de altura y tiene diversas aplicaciones, entre las que figura su utilización como floculante para el cieno del agua de lluvia que llena los jagüeyes (Villalobos *et al.*, 2007).

La estructura del mucilago extraído de *Stenocereus griseus* es propia de polímeros con al menos dos cadenas de polisacáridos que presentan interacciones de puentes de hidrógeno, entre grupos carboxílicos, o entre grupos alcohólicos o con enlaces cruzados entre un catión polivalente como el Ca^{2+} , el cual actúa como grupo central y los grupos carboxílicos del ligando de polisacáridos (Keller, 1983 y Muzarelli, 1973 citado en Henríquez-Rodríguez *et al.*, 2009). Desde el punto de vista bioquímico, los mucilagos de *S. griseus* están compuestos principalmente por ramnosa, arabinosa, galactosa y ácidos urónicos. El análisis de los tipos de enlace predominantes en la fracción soluble de *S. griseus* ha confirmado la presencia de unidades de galactopiranosas y ácidos urónicos (Henríquez-Rodríguez *et al.*, 2009).

Investigaciones previas han demostrado la efectividad de una mezcla mucilaginoso cruda de *S. griseus* como coagulante en la potabilización de aguas con turbiedades bajas (20 UNT-100 UNT) (Fuentes *et al.*, 2011) y muy altas a un intervalo de turbidez inicial desde 200 UNT hasta 300 UNT (González *et al.*, 2016). También se ha estudiado la eficiencia del mucilago desecado de *S. griseus* para el tratamiento de aguas con turbiedades iniciales entre 50 y 100 UNT (Fuentes *et al.*, 2014), por lo cual constituye una alternativa natural en contraste con los productos de origen químico que comúnmente se utilizan y es pertinente continuar estudiando su efectividad en otros rangos de turbidez.

Materiales y Métodos

Recolección de muestras de *Stenocereus griseus*

La cactácea *Stenocereus griseus* utilizada en esta investigación se recolectó en el sector Monte Pío del municipio Cabimas, estado Zulia (Venezuela); y el material vegetal fue trasladado al laboratorio para la realización de los ensayos correspondientes.

Preparación de la mezcla coagulante

Se utilizó una metodología reportada previamente (Fuentes *et al.*, 2011). Para ello se recolectó una cantidad moderada de fragmentos de tallos de la cactácea *S. griseus*, a los cuales se les retiró la epidermis separando el tejido parenquimatoso, ubicado entre el cilindro sólido o prostostela y la epidermis. Este parénquima se licuó durante 48 segundos en un procesador doméstico, se separó la fase sólida de la acuosa con ayuda de un lienzo de gasa y mediante gravimetría se determinó la cantidad de mucilago. Posteriormente, se agregó agua destilada hasta obtener una mezcla heterogénea mucilaginososa con una concentración de 48,38 % m/v (Figura 1). Se emplearon dosis de 2 mL (968 ppm), 3 mL (1451 ppm), 4 mL (1935 ppm), 5 mL (2419 ppm) y 6 mL (2903 ppm).

Recolección de las muestras de agua del grifo

Las muestras de agua se recolectaron del grifo en el Laboratorio de Investigaciones Ambientales del Núcleo LUZ-Costa Oriental del Lago (LIANCOL), estado Zulia (Venezuela) y se caracterizaron en cuanto a los parámetros fisicoquímicos turbidez, color, pH y alcalinidad.

Preparación del agua sintética

El agua sintética se preparó agregando una mezcla arcillosa al agua proveniente del grifo. Esto con la finalidad de llevarla a los valores de turbidez inicial requeridos para este estudio (100, 120, 140, 160, 180 y 200 UNT). La mezcla de arcilla fue preparada con 26 gramos de la misma, adicionando agua del grifo hasta completar 100 mL, posteriormente se agitó durante 5 minutos para obtener una mezcla lo más uniforme posible y se sedimentó durante 24 horas antes de su utilización para garantizar la hidratación de las partículas.

Prueba de jarras: simulación del proceso de clarificación del agua

Se simuló las fases de coagulación, floculación y sedimentación en un equipo de Jarras, Modelo JLTG (Leaching Test Digital). Las pruebas de jarras fueron utilizadas para medir la efectividad del coagulante obtenido de *S. griseus* (se hicieron por triplicado) en muestras de agua cruda sintética con valores de turbidez entre 100 y 200 UNT, con el fin de encontrar la dosis óptima de *S. griseus*.

Se agregó agua sintética en cada uno de los seis vasos de precipitado con capacidad de un litro utilizados en el equipo de jarras. Inmediatamente se adicionaron en cinco vasos las dosis correspondientes de la mezcla coagulante para realizar la mezcla rápida (un minuto a 100 rpm) y la mezcla lenta (veinte minutos a 30 rpm). Además, se dejó un vaso sin tratamiento (control).

Al finalizar la agitación lenta, se aplicó la fase de sedimentación durante 30 minutos. Luego, se determinaron los parámetros fisicoquímicos (turbidez, color, pH y alcalinidad) antes y después de la filtración en las muestras de agua tratadas con el coagulante *S. griseus*, así como en el control. Para la fase de filtración de estas aguas se utilizaron seis embudos cada uno con un papel de filtro, con el fin de simular el procedimiento que se lleva a cabo en las plantas potabilizadoras.

Determinación de los parámetros fisicoquímicos en aguas tratadas con la mezcla mucilaginososa de *S. griseus*

Los parámetros fisicoquímicos se evaluaron tomando en consideración los procedimientos establecidos por APHA-AWWA-WEF (1998). Se aplicó el método potenciométrico para determinar el pH, el método



Figura 1. Proceso de obtención de una mezcla mucilaginososa de *S. griseus*.

colorimétrico para medir el color, el método nefelométrico para caracterizar la turbidez y el método volumétrico para establecer los valores de alcalinidad.

Resultados y Discusión

Caracterización del agua de grifo

En las muestras de agua de grifo recolectadas, los valores de pH variaron entre 6,52 y 7,58 unidades, ajustándose a lo establecido en las Normas Sanitarias de Calidad del Agua Potable de Venezuela (6,5 y 8,5). La turbidez osciló entre 7,67 UNT y 8,36 UNT, intervalo que no se ubicó dentro de los valores permisibles. La alcalinidad fluctuó entre 30 mg CaCO₃/L y 34 mg CaCO₃/L y el color se ubicó dentro de la norma, ya que varió hasta 15 UC Pt/Co, siendo éste el valor máximo permitido.

Caracterización del agua sintética

Las muestras de agua sintética presentaron los valores que se reflejan en la Tabla 1.

Evaluación del parámetro turbidez

Los valores de turbidez en muestras de agua con turbiedades iniciales comprendidas en un intervalo entre 100 UNT y 200 UNT tratadas con una mezcla mucilaginoso de *Stenocereus griseus* se presentan gráficamente, reflejándose los valores de turbidez antes de la fase de filtración (Figura 2) y después de la misma (Figura 3).

Para una turbidez inicial de 100 UNT, antes de filtrar se observa en la figura 2 que la turbidez residual se ubica entre 16,23 UNT y 28,27 UNT con porcentajes de remoción que varían desde 71,73 % hasta 83,77 % y una dosis óptima de 1935 ppm. Después de filtrar, en la figura 3 se muestra que la turbidez residual fluctúa entre 5,32 UNT y 8,25 UNT, por tanto no se ajusta a la normativa de calidad de agua potable de Venezuela (Gaceta Oficial de Venezuela, 1998) que establece un valor máximo permisible de 5 UNT, pero los porcentajes de remoción son superiores a 91,00 %.

Tabla 1. Valores de los parámetros fisicoquímicos en muestras de agua sintética antes de la adición del coagulante.

Turbidez (UNT)	Color (UC Pt-Co)	pH	Alcalinidad (mg CaCO ₃ /L)
100	100	7,18	24,00
120	140	7,05	26,00
140	200	6,67	28,00
160	250	6,58	27,33
180	330	7,25	40,00
200	360	6,90	32,67

Al evaluar la turbidez inicial correspondiente a 120 UNT, en la figura 2 se observan valores de turbidez residual que fluctúan entre 14,87 UNT y 22,93 UNT con porcentajes de remoción que oscilan entre 80,89 % y 87,61 % y una dosis óptima de 1451 ppm. Después de filtrar, se logra remover la turbidez con la mezcla mucilaginoso de *S. griseus* a valores que fluctúan entre 3,07 UNT y 4,62 UNT, tal y como se representa en la figura 3, con porcentajes de remoción de turbidez que oscilan entre 96,15 % y 97,44%. A este nivel de turbiedad y para todas las dosis en estudio se obtienen valores inferiores al máximo permisible (5 UNT), según las Normas de Calidad de Agua Potable de Venezuela (Gaceta Oficial de Venezuela, 1998).

Como se muestra en la figura 2, para una turbidez inicial de 140 UNT, los valores de turbidez residual se encuentran entre 17,73 UNT y 23,90 UNT antes de filtrar, con porcentajes de remoción que varían desde 82,93 % hasta 87,34 % y con una dosis óptima de 1935 ppm. En la figura 3 se presentan los valores de turbidez residual al culminar la fase de filtración, los cuales oscilan entre 5,78 UNT y 6,35 UNT; y se alcanzan porcentajes de remoción entre 95,46 % y 95,87 % después de filtrar, lo que demuestra que el coagulante fue efectivo, y aun cuando no se ajustaron

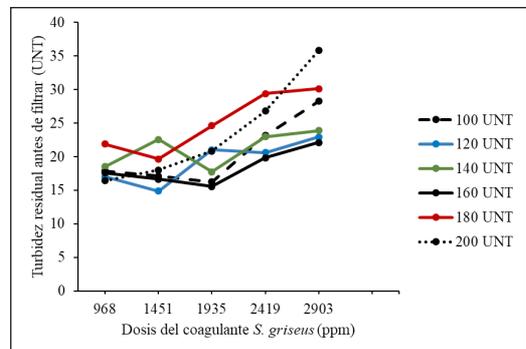


Figura 2. Comportamiento de la turbidez residual (antes de filtrar) en aguas tratadas con una mezcla mucilaginoso de *S. griseus*.

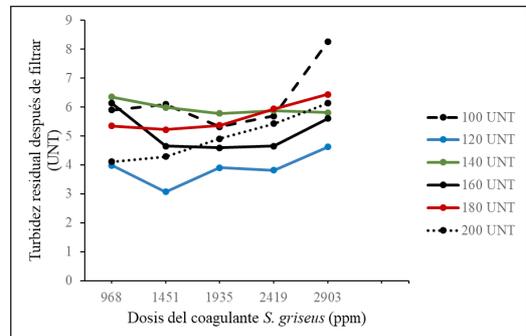


Figura 3. Comportamiento de la turbidez residual (después de filtrar) en aguas tratadas con una mezcla mucilaginoso de *S. griseus*.

a la normativa vigente en Venezuela, son muy cercanos al valor máximo establecido (5 UNT).

En relación a la turbidez inicial de 160 UNT, se registra un rango de turbidez residual en un intervalo de 15,57 UNT - 22,10 UNT, tal y como se visualiza en la figura 2, con porcentajes de remoción de turbidez que varían desde 86,19 % hasta 90,27 % y una dosis óptima de 1935 ppm. Después de filtrar, en la figura 3 se observan valores que reflejan turbiedades residuales desde 4,59 UNT hasta 6,13 UNT, con porcentajes de remoción entre 96,17 % y 97,13 %, donde la mayoría de éstos se ajusta al límite máximo permisible (5 UNT), tal y como se establece en las Normas de Calidad del Agua Potable de Venezuela (Gaceta Oficial de Venezuela, 1998).

Con respecto a la turbidez inicial de 180 UNT, el coagulante se comportó de manera similar a las muestras anteriores. Sin embargo, en la figura 2 se presentan valores de turbidez residual antes de filtrar, que en general son superiores (19,67 UNT - 30,13 UNT) a los descritos para las turbiedades iniciales previas, con porcentajes de remoción entre 83,26 % y 89,07 %. Después de completar la fase de filtración, en la figura 3 se representan gráficamente los valores de turbidez residual, los cuales varían entre 5,22 UNT y 6,44 UNT (96,42 % - 7,10 % de remoción) y no se ubican en límites aceptables, pero son muy cercanos al valor máximo establecido (5 UNT) en la normativa vigente (Gaceta Oficial de Venezuela, 1998).

Tal y como se indica en la figura 2, para una turbiedad inicial de 200 UNT se alcanzan valores de turbidez residual entre 16,43 UNT y 35,80 UNT antes de filtrar, con porcentajes de remoción en un rango correspondiente a 82,10 % - 91,78 % y una dosis óptima de 968 ppm. No obstante, es importante resaltar que algunos de los valores de turbidez que se obtienen son menores o iguales a varios de los valores que se muestran para las turbiedades anteriores; y dado que la dosis óptima es la menor dosis de *S. griseus* que se aplica (968 ppm), se confirma el supuesto de Andía (2000), quien asevera que al aumentar la turbidez se requiere una menor concentración de coagulante debido a que la probabilidad de colisión entre las partículas es muy elevada y la coagulación se realiza con mayor facilidad.

Después de filtrar, para la turbiedad inicial correspondiente a 200 UNT se alcanzaron valores de turbidez residual entre 4,11 UNT y 6,13 UNT con porcentajes de remoción que oscilaron entre 96,94 % y 97,95 %. La mayor parte de los valores se ajustaron a lo establecido en las Normas de Calidad de Agua Potable de Venezuela (Gaceta Oficial de Venezuela, 1998).

En general, para los valores de turbidez en estudio se observa una tendencia conforme a la cual, a medida que aumenta la dosis de coagulante se incrementa la turbidez, exceptuando la dosis de 1935 ppm y/o la de 1451 ppm, o ninguna. Esto puede explicarse

por la reestabilización de la carga de la partícula debido a que el exceso de coagulante es absorbido en la superficie de la misma, produciendo una carga invertida a la original, en consecuencia, no se produce una buena coagulación y la turbidez tiende a aumentar, esto se debe a la formación de gran cantidad de microfloculos con tamaños muy pequeños cuyas velocidades de sedimentación son muy bajas, por lo tanto la turbiedad residual es igualmente elevada (Andía, 2000). Este comportamiento coincide con lo reportado por Mejías *et al.* (2010), quienes al estudiar el agente coagulante *Cedrela odorata* observaron un comportamiento similar. Esto se puede explicar por la composición bioquímica del mucílago de *S. griseus* y su posible mecanismo de coagulación.

Específicamente, los mucílagos de las cactáceas tienen una composición similar a los exudados de gomas de los géneros *Sterculia* y *Khaya*, las cuales tienen más ácido galacturónico y más ramnosa que las pectinas y también se ha indicado la presencia de taninos, alcaloides, triterpenos o esteroides, flavonoides, coumarinas y quinonas en extractos de corteza de *Cedrela odorata* (Pereira *et al.*, 2013). Dado que *S. griseus* posee azúcares (ramnosa, arabinosa y galactosa) y ácidos urónicos (Henríquez-Rodríguez *et al.*, 2009); y también se ha reportado la presencia de alcaloides, sesquiterpenlactonas, coumarinas y oxidrilos fenólicos en plántulas de *S. griseus* (Treviño, 2000), se pudiera inferir que la semejanza en su composición bioquímica pudiera originar el comportamiento similar entre *S. griseus* y *Cedrela odorata* con respecto al aumento de la turbidez conforme se incrementa la dosis de estos agentes coagulantes.

Adicionalmente, se encuentra una similitud en cuanto al comportamiento de *S. griseus* y agentes coagulantes derivados de otras cactáceas, tales como *Opuntia ficus-indica* (González *et al.*, 2009) en aguas con un rango de turbidez entre 100 UNT-200 UNT y *Opuntia wentiana* (Parra *et al.*, 2011) en el tratamiento de aguas a un intervalo de turbidez que fluctuó entre 100 UNT y 160 UNT. También, el cardón *S. griseus* aplicado como una mezcla mucilaginoso en aguas con turbiedades iniciales que variaron desde 20 UNT hasta 100 UNT (Fuentes *et al.*, 2011) y en aguas con un intervalo de turbidez correspondiente a 220 UNT-300 UNT (González *et al.*, 2016), exhiben una tendencia parecida.

El comportamiento de la mezcla coagulante de *S. griseus*, tal y como se describe en el presente artículo, se contrapone a lo referido por Ali *et al.* (2010) al emplear *Moringa oleifera* y determinar que al aumentar la dosis de este coagulante de origen vegetal, disminuye la turbidez residual. Igualmente, difiere del comportamiento que presenta el quitosano para turbiedades de 160 UNT, 180 UNT y 200 UNT y dosis entre 12 ppm y 24 ppm (Caldera *et al.*, 2017); y del que muestra la quitina para turbiedades iniciales entre 200 UNT y 300 UNT y dosis desde 12 ppm hasta 40 ppm (Fuentes *et al.*, 2017), donde al incrementar

la dosis de estos coagulantes de origen animal, disminuye la turbidez.

Atinente a los mecanismos de coagulación, para *S. griseus* se considera que pueda ser el de puente-partícula, por cuanto es un mucílago que muestra un comportamiento similar a las pectinas y la estructura del mismo es propia de polímeros con al menos dos cadenas de polisacáridos y con interacciones de puentes de hidrógeno (Henríquez-Rodríguez *et al.*, 2009); de tal modo que el polímero en cuestión puede adsorber las partículas en suspensión mediante puentes de hidrógeno hasta que su estructura lo permita, pero la excesiva carga de polímero puede generar una reestabilización de la suspensión (Andía, 2000). De allí la importancia de aplicar las dosis óptimas para cada valor de turbidez inicial.

Debido a que no hay nada concluyente con respecto al mecanismo de coagulación para *S. griseus*, se puede suponer que opera el mecanismo de adsorción y enlace de puente interpartícula propuesto por Henríquez-Rodríguez (2009); coincidiendo con Bouaouine *et al.* (2019), quienes según un estudio realizado con *Opuntia ficus-indica*, identificaron como moléculas responsables de la coagulación a la quercetina (un flavonoide) con grupos polifenólicos y almidón (un polímero ramificado de glucosa con funciones hidroxilicas) que tienen un poder floculante sinérgico mediante un mecanismo a modo de puente de adsorción (70 % de eliminación de turbidez para quercetina contra 93 % de remoción total al adicionar almidón).

Se puede considerar válida la suposición hecha, dado que la composición bioquímica de *O. ficus-indica* (proteínas, polisacáridos, ácidos urónicos, polifenoles y taninos), según refieren Bouaouine *et al.* (2019), y de *S. griseus*, de acuerdo a Henríquez-Rodríguez (2009) (polisacáridos y ácidos urónicos), es similar en cuanto a la presencia de azúcares, así como de ácidos urónicos. Además, ambas especies coagulantes pertenecen a la misma familia Cactaceae.

Análisis de las dosis óptimas de la mezcla mucilaginoso de *S. griseus*

La dosis óptima es la mínima concentración de coagulante que se requiere para obtener el menor valor de turbidez. Para cada una de las dosis óptimas, se presentan en la tabla 2 los valores de turbidez residual. Antes de filtrar, los mismos son superiores a los requeridos según la normativa venezolana para la calidad del agua potable (Gaceta Oficial de Venezuela, 1998) y sus porcentajes de remoción son superiores a 83,77 %, lo cual permite catalogarlo como un coagulante primario (supera el 70 % de remoción de turbidez) que puede ser aplicado en las zonas rurales o urbanas que carezcan de planta potabilizadora. Después de la fase de filtración, las muestras de agua con turbiedades iniciales de 120 UNT, 160 UNT y 200 UNT se ajustan al valor máximo permisible; pero las muestras de agua con turbiedades de 100 UNT, 140 UNT y 180 UNT se encuentran ligeramente por encima de lo establecido en dicha norma. Los porcentajes de remoción de turbidez se ubican entre 94,68 % y 97,94 %, demostrando la efectividad del coagulante extraído de *S. griseus* y la relevancia de la fase de filtración para lograr un proceso óptimo de clarificación del agua.

Los porcentajes de remoción de turbidez obtenidos son superiores a los reportados por Fuentes *et al.* (2011), quienes utilizaron el mismo coagulante extraído de *S. griseus*, pero con turbiedades bajas (20 UNT y 100 UNT) y determinaron porcentajes de remoción entre 14,50 % y 80,42 % antes de filtrar y entre 69,27 % y 96,46 % después de la filtración.

Las remociones de turbidez del presente estudio resultaron análogas a las de Mendoza *et al.* (2008), quienes lograron porcentajes de remoción de turbidez después de la fase de filtración entre 94,53 % y 98,20 % usando pencas de *Hylocereus lemairei* como coagulante natural. Asimismo, hay coincidencias con Rodríguez *et al.* (2002), cuando evaluaron el cotiledón de la semilla de *Moringa oleifera* Lam arrojando valores de remoción de turbidez entre 99,10 % y 99,50

Tabla 2. Turbiedades, dosis óptimas y porcentajes de remoción de turbidez de aguas sintéticas tratadas con una mezcla mucilaginoso de *S. griseus*.

Turbidez Inicial (UNT)	Dosis óptima del coagulante (ppm)	Turbidez antes de filtrar (UNT)	Remoción de turbidez antes de filtrar (%)	Turbidez después de filtrar (UNT)	Remoción de turbidez después de filtrar (%)
100	1935	16,23 ± 0,74	83,77	5,32 ± 0,88	94,68
120	1451	14,87 ± 0,24	87,61	3,07 ± 0,23	97,44
140	1935	17,73 ± 1,43	87,33	5,78 ± 0,78	95,87
160	1935	15,57 ± 1,44	90,27	4,59 ± 0,49	97,13
180	1451	19,67 ± 1,44	89,07	5,22 ± 0,22	97,10
200	968	16,43 ± 1,80	91,78	4,11 ± 0,25	97,94

*Valores de turbidez antes y después de filtrar más desviación estándar para n=3

% posteriores a la fase de filtración; y con González *et al.* (2016) al obtener remociones de turbidez que oscilaron entre 98,29 % hasta 99,37 % después de filtrar, cuando aplicaron una mezcla mucilaginosa de *S. griseus*.

Evaluación del parámetro color

Después de simular la etapa de clarificación en las muestras de agua tratadas con una mezcla mucilaginosa de *S. griseus* y obtener las dosis óptimas del coagulante, el color varía entre 26,67 UC Pt-Co y 46,67 UC Pt-Co antes de filtrar y entre 13,33 UC Pt-Co y 26,67 UC Pt-Co después de esta fase. Las muestras con turbiedades iniciales de 100 UNT y 120 UNT se ajustan a la normativa vigente en Venezuela (Gaceta Oficial de Venezuela, 1998), la cual establece un valor máximo permisible de 15 UC Pt-Co. El resto de los valores estudiados no se ajusta al límite exigido, pero es importante resaltar que la aplicación de las dosis óptimas de *S. griseus* permite alcanzar elevados porcentajes de remoción de color que fluctúan entre 86,67 % y 93,52 % después de la filtración.

Al comparar con investigaciones previas, el parámetro color se ubica en valores inferiores a los reportados para *Opuntia wentiana* que fluctuaron entre 70 UC Pt-Co - 80 UC Pt-Co antes de filtrar y entre 50 UC Pt-Co y 80 UC Pt-Co después de ello (Parra *et al.*, 2011), lo cual demuestra mayor efectividad de *S. griseus* para la remoción de color con respecto a esta otra cactácea. Por otra parte, al comparar los valores de color del presente estudio con los reportados por Fuentes *et al.* (2011) para *S. griseus* a baja turbidez, se observa que son superiores, evidenciándose menor eficiencia en la remoción de color a valores entre 100 UNT- 200 UNT de turbidez inicial. Adicionalmente, se encuentra similitud con González *et al.* (2016) al investigar *S. griseus* a valores más altos de turbidez inicial (200 UNT-300 UNT) que los indicados en el presente estudio (100 UNT-200 UNT), debido a que solo para dos valores de turbidez inicial (200 UNT y 220 UNT) se cumple con la normativa para el color, mientras que el resto de los valores estudiados superan el valor máximo permisible (15 UC Pt-Co).

Aun cuando el parámetro color se ajusta a lo establecido en las Normas Sanitarias de Calidad de Agua Potable (Gaceta Oficial de Venezuela, 1998) solamente para dos valores de turbidez inicial en el presente estudio, resulta relevante que los resultados arrojan porcentajes de remoción superiores a 86 %, lo que indudablemente demuestra la efectividad de la mezcla mucilaginosa de *Stenocereus griseus* (Haw.) Buxb. en la remoción de color.

Evaluación del parámetro pH

Los valores de pH que se obtienen con las dosis óptimas del coagulante *S. griseus* fluctúan entre 6,42 y 6,94 unidades antes de filtrar y entre 6,23 y 6,98 después de filtrar. En la figura 4 se observa que antes de filtrar, para turbiedades iniciales entre 100 y 200 UNT se cumple con las Normas Sanitarias de Calidad del Agua Potable de Venezuela (Gaceta Oficial de

Venezuela, 1998), excepto para la turbidez de 160 UNT que es ligeramente inferior al rango permisible (6,5 y 8,5 unidades).

Después de la filtración, las turbiedades de 100 UNT y 200 UNT se ubican dentro del rango permisible, las restantes entre 120 UNT y 180 UNT se encuentran ligeramente por debajo del rango permisible y presentan reducciones mínimas del pH que no son superiores a 0,8 unidades, coincidiendo con Contreras *et al.* (2015) quienes al aplicar varios tratamientos con *O. ficus indica* y alumbre reportaron reducciones leves en el pH que no resultaron mayores de 0,7 unidades.

Por otra parte, se observa que con la dosis óptima más baja (968 ppm), la intermedia (1451 ppm) y la más alta (1935 ppm), se obtienen valores de turbidez que se ajustan a la normativa para turbiedades iniciales de 200 UNT, 120 UNT y 160 UNT, respectivamente; aunado a que los valores restantes se ubican muy cerca del máximo permisible (5 UNT). Esto demuestra que las ligeras variaciones de pH, a pesar de que algunas de las muestras se ubican fuera del rango establecido en la normativa vigente en Venezuela (6,5-8,5), no inciden en la efectividad de *S. griseus* para la remoción de turbidez.

Los valores que se registran después del tratamiento de las muestras de agua con *S. griseus*, son similares a los reportados por Fuentes *et al.* (2011) al emplear esta cactácea en el tratamiento de aguas con turbiedades iniciales entre 20 UNT y 100 UNT, quienes obtuvieron valores de pH que variaron desde 5,97 hasta 6,98 unidades. Sin embargo, al contrastarlos con González *et al.* (2016) al estudiar el coagulante *S. griseus* en aguas con mayor rango de turbidez inicial (200 UNT-300 UNT), se observa que difieren, pues el pH aumenta ligeramente después del tratamiento.

Evaluación del parámetro alcalinidad

En la figura 5 se muestra el comportamiento de la alcalinidad para los diferentes valores de turbidez inicial y dosis óptimas. El parámetro alcalinidad presenta ligeras variaciones, se registran valores

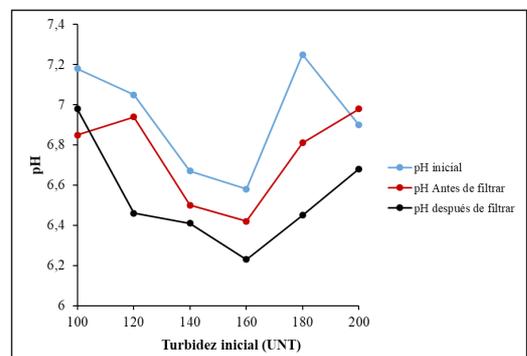


Figura 4. Comportamiento del pH en aguas con alta turbidez (100 UNT-200 UNT) tratadas con las dosis óptimas de una mezcla mucilaginosa de *S. griseus*.

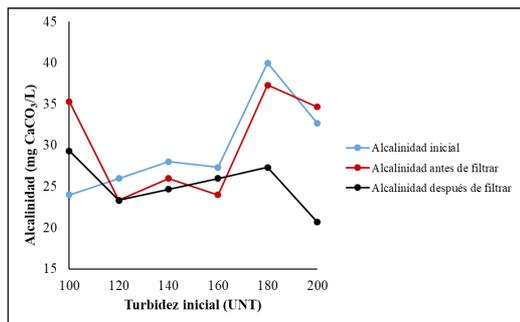


Figura 5. Comportamiento de la alcalinidad en aguas con alta turbidez (100 UNT-200 UNT) tratadas con las dosis óptimas de una mezcla mucilaginosas de *S. griseus*.

menores de 40 mg CaCO₃/L. A pesar de que la normativa venezolana no contempla la alcalinidad como parámetro de calidad en las aguas potables, se ubican dentro de lo permisible, ya que éste es aceptable hasta 140 mg CaCO₃/L, según Merrit (1992) y Doudelet (1981). Asimismo, se ajusta a lo señalado por el Ministerio de la Protección Social, Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial de Colombia (2007), el cual establece como límite máximo una alcalinidad de 120 mg CaCO₃/L.

En referencia a los valores máximos permisibles, la alcalinidad fue baja, lo cual puede incidir en la efectividad del proceso de coagulación, puesto que para favorecer esta fase del proceso de potabilización, se requiere un exceso de alcalinidad (Romero, 2005). Esto se debe a que en el caso de los coagulantes inorgánicos metálicos, los iones OH⁻, CO₃²⁻ y HCO₃⁻ que confieren la alcalinidad al agua, pueden formar precipitados con los iones de sales metálicas durante la coagulación. No obstante, los coagulantes naturales pudieran tener alguna similitud con los coagulantes inorgánicos, pues para las cactáceas, se ha demostrado que especies del género *Opuntia* contienen cantidades importantes de minerales entre ellos calcio, encontrándose en forma de cristales de oxalato de calcio o en forma libre (Palacios *et al.*, 2016) que pudieran influir en el fenómeno de coagulación.

Los resultados que se representan en la figura 5 son similares a los reportados por González *et al.* (2016), quienes obtuvieron disminuciones de la alcalinidad después del tratamiento de aguas altamente turbias (200 UNT - 300 UNT) con una mezcla mucilaginosas de *S. griseus*. Igual comportamiento refirieron Fuentes *et al.* (2011) en la mayoría de los resultados, cuando evaluaron este parámetro en aguas con baja turbidez (20 UNT - 100 UNT) tratadas con *S. griseus*.

Conclusiones

Se demostró la efectividad del mucilago *Stenocereus griseus* como coagulante natural para la clarificación del agua con valores de turbidez entre 100 UNT y 200 UNT y dosis óptimas entre 968 ppm y 1935 ppm. Los

porcentajes de remoción fueron mayores de 83,77 %, pudiéndose emplear como coagulante primario.

El pH fluctuó entre 6,42 y 6,94 unidades antes de filtrar y después de la fase de filtración entre 6,23 y 6,98 unidades. El parámetro alcalinidad presentó poca variabilidad, pero no superó el valor máximo aceptable y una vez aplicado el tratamiento, se mantuvo cercano al valor inicial del agua sintética, con valores menores a 40 mg CaCO₃/L.

Se evidenció que el color estuvo dentro de los límites establecidos por las Normas de Calidad de Agua Potable de Venezuela (15 UC Pt-Co) para turbiedades de 100 UNT y 120 UNT, después de la filtración. Los valores restantes no se ajustaron a la citada normativa, pero se alcanzaron porcentajes de remoción de color superiores a 85 %.

Recomendaciones

Realizar un estudio similar, pero aumentando la alcalinidad para determinar si mejora la efectividad de *S. griseus* como coagulante.

Evaluar la efectividad de *S. griseus* en forma desecada para el rango de turbidez estudiado (100 UNT-200 UNT).

Referencias

- Ali, E., S. Muyibi, H. Salleh, M. Alam, M. Salleh. 2010. Production of natural coagulant from *Moringa oleifera* seed for application in treatment of low turbidity water. *J. Water Resource and Protection* 2: 259-266.
- Andía, Y. (2000). Tratamiento de agua: coagulación y floculación. SEDAPAL. Lima. 44 p.p.
- APHA-AWWA-WEF (1998). Standard Methods for examination of water and wastewater. 20th Edition.
- Arancibia, M. (2011). Aplicación de quitosano como material bioabsorbente en el proceso de coagulación-floculación durante el tratamiento de agua para consumo humano. Para obtener Título de Grado Académico de Magister en Producción Más Limpia. Universidad Técnica de Ambato.
- Barrenechea, A., V. Maldonado, M. Aurazo & L. Vargas. 2004. *Tratamiento de agua para consumo humano. Plantas de filtración rápida*. Organización Panamericana de la Salud. Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente. Manual I. Tomo II. Editorial CEPIS/ OPS. Lima, Perú.
- Bouaouine, O., I. Bourven, F. Khalil, P. Bressollier & M. Baudu. 2019. Identification and role of *Opuntia ficus indica* constituents in the flocculation mechanism of colloidal solutions. *Separation and Purification Technology* 209: 892-899.
- Briceño, R., L. Fuentes, I. Mendoza, J. Bolaños & Y. Caldera. 2014. Efectividad de una suspensión gelatinosa de huesos bovinos en la clarificación de aguas con alta turbidez. *REDIELUZ* 4:46-53.
- Caldera Y., L. Fuentes, G. Puyosa, R. Barrera, I. Mendoza & Y. González. 2017. Quitosano como coagulante natural durante el tratamiento de aguas con alta turbidez. *Boletín del Centro de Investigaciones Biológicas* 51:19-30.
- Campdelacru, J. 2012. Enfermedad de Parkinson y enfermedad de Alzheimer: factores de riesgo ambientales. *Neurología* 29:541-549.
- Contreras K., Y. Mendoza, G. Salcedo, R. Olivero & G.

- Mendoza. 2015. El Nopal (*Opuntia ficus-indica*) como coagulante natural complementario. *Producción + Limpia* 10: 40-50.
- Doudelet, A. 1981. Estudio de las aguas minerales. *Geotermia* 4: 5-28.
- Fuentes, L., Y. Aguilar, Y. Caldera & I. Mendoza I. 2014. Dispersión gelatinosa de huesos bovinos para la clarificación de aguas con baja turbidez. *Revista Tecnocientífica URU* 7:71-81.
- Fuentes, L., I. Mendoza, P. Díaz, Y. Fernández, A. Zambrano A. & Z. Villegas. 2012. Potencial coagulante de la tuna *Opuntia cochinellifera* (L.) Mill. (cactaceae) en aguas para consumo humano. *Boletín del Centro de Investigaciones Biológicas* 46:173-187.
- Fuentes, L., I. Mendoza, A. Chávez, N. Cedeño & Y. Ortiz. 2017. Evaluación de la quitina como coagulante para la potabilización de aguas con alta turbidez. *Impacto Científico* 12: 89-106.
- Fuentes, N., E. Molina & C. Ariza. 2016. Coagulantes naturales en sistemas de flujo continuo, como sustituto del $Al_2(SO_4)_3$ para clarificación de aguas. *Producción + Limpia* 11:41-54.
- Fuentes, L., W. Contreras, R. Perozo, I. Mendoza & Z. Villegas. 2008. Uso del quitosano obtenido de *Litopenaeus schmitti* (Decapoda, Penaeidae) en el tratamiento de agua para el consumo humano. *Multiciencias* 8:281-287.
- Fuentes, L., I. Mendoza, A. López, M. Castro & C. Urdaneta. 2011. Efectividad de un coagulante extraído de *Stenocereus griseus* (Haw.) Buxb. en la potabilización del agua. *Revista Técnica Ingeniería Universidad del Zulia* 34: 48-56.
- Fuentes, L., M. Jiménez, G. Maldonado, Y. González, Y. Caldera & I. Mendoza (2014). Potencial coagulante del mucilago desecado de *Stenocereus griseus* (Haw.) Buxb. (Cactaceae) en aguas con baja turbidez. Universidad del Zulia. Núcleo Costa Oriental del Lago. 9 al 11 de julio de 2014. 113-119.
- Gaceta Oficial de la República de Venezuela. 1998. Normas Sanitarias de Calidad del Agua Potable. N° 36.395 del 13 de febrero de 1998.
- González, Y., I. Mendoza, Y. Caldera, A. Osorio & L. Yoris. 2016. Clarificación de aguas altamente turbias empleando *Stenocereus griseus* (Haw.) Buxb. como coagulante. *Impacto Científico* 11(1):61-75.
- González, Y., N. Marcano, I. Mendoza & L. Fuentes. 2009. Efectividad de una suspensión de *Opuntia ficus-indica* (L.) Mill. (Cactaceae) en la clarificación de agua sintéticas con alta turbidez. *Impacto Científico* 4:361-374.
- González, G., M. Chávez, D. Mejías, M. Mas y Rubí, N. Fernández & G. León de Pinto. 2006. Use of exudated gum produced by *Samanea saman* in the potabilization of the water. *Revista Técnica de la Facultad de Ingeniería Universidad del Zulia* 29:14-22.
- Henríquez-Rodríguez, A., J. Pérez, J. Gascó, O. Rodríguez & A. Prieto. 2009. Caracterización bioquímica preliminar de los principales componentes del mucilago del cardón dato *Stenocereus griseus* (Haw. F. Buxb). *Revista Unell. Ciencia Técnica* 27:95-102.
- Hernández, B., I. Mendoza, M. Salamanca, L. Fuentes & Y. Caldera. 2013. Semillas de tamarindo (*Tamarindus indica*) como coagulante en aguas de alta turbiedad. *REDIELUZ* 3:91-96.
- López, P., M. Lugo, I. Mendoza & L. Fuentes. 2014. Uso de las semillas de *Linum usitatissimum* como coagulante natural para la potabilización de aguas con alta turbidez. Memorias Arbitradas del I Congreso de Ciencias Ambientales del Núcleo Costa Oriental del Lago y V Jornadas del Laboratorio de Investigaciones Ambientales (LIANCOL). Universidad del Zulia, Núcleo Costa Oriental del Lago, Cabimas, estado Zulia, Venezuela. 579 pp.
- Mejías, D., M. Chávez, M. Mas y Rubí, E. Chacín & N. Fernández. 2010. Uso potencial del exudado gomoso de *Cedrela odorata* como agente coagulante para el tratamiento de las aguas destinadas a consumo humano. *Revista Forestal Venezolana* 54:147-153.
- Mendoza, I., L. Fuentes, Y. Caldera, F. Perdomo, A. Suárez, N. Mosquera & H. Arismendi. 2008. Eficiencia de *Hylocereus lemairei* como coagulante-floculante en aguas para consumo humano. *Impacto Científico* 3:53-69.
- Merritt, F. 1992. *Manual del Ingeniero Civil*. 3ª Edición. Tomo IV, México. Editorial McGraw Hill.
- Meza-Leones, M., K. Riaños-Donado, I. Mercado-Martínez, R. Olivero-Verbel & M. Jurado-Eraso. 2018. Evaluación del poder coagulante del sulfato de aluminio y las semillas de *Moringa oleifera* en el proceso de clarificación del agua de la ciénaga de Malambo, Atlántico. *Revista UIS Ingenierías* 17:95-104.
- Ministerio de la Protección Social, Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial de Colombia (2007). Resolución Número 2115. Colombia, 23 p.p.
- Olivero, R., I. Mercado & I. Montes. 2013. Remoción de la turbidez del agua del río Magdalena usando el mucilago del nopal *Opuntia ficus-indica*. *Producción + Limpia* 8:19-27.
- Palacios, A., C. De Lira, A. Del Real & M. Rodríguez. 2016. Distribución y densidad de cristales de oxalato de calcio en cladodios de *Opuntia streptacantha lemaire*, en función de su peso. *Investigación y Desarrollo en Ciencia y Tecnología de Alimentos* 1:389-394.
- Parra, Y., M. Cedeño, M. García, I. Mendoza, Y. González & L. Fuentes. 2011. Clarificación de aguas de alta turbidez empleando el mucilago de *Opuntia wentiana* (Britton & Rose) / (Cactaceae). *REDIELUZ* 1:27-33.
- Pereira, F., V. Serrão, R. Bergamasco & M. Ribau. 2017. The use of *Moringa oleifera* as a natural coagulant in surface water treatment. *Chemical Engineering Journal* 313:226:237.
- Rodríguez, S., O. García & R. Muñoz. 2002. Una solución para la clarificación de aguas para consumo humano. *Noticias Técnica de Laboratorio* 1:21-22.
- Romero, J. (2005). Calidad del agua. 2ª Edición. Editorial Escuela. Colombia.
- Pereira, S., D. Vega, C. Almeida, C. Morales, Y. Viera & Y. Sánchez. 2013. Actividad antimicrobiana in vitro de *Cedrela odorata* L. (cedro). *Revista Cubana de Plantas Medicinales* 18:513-521.
- Treviño, J. 2000. Estudio comparativo de los componentes químicos de callo y plántula de *Stenocereus griseus* / (Hawort) Buxbaum. Tesis presentada para optar al grado de Maestría en Ciencias con Especialidad en Botánica. Universidad Autónoma de Nuevo León. México. 53 p.p.
- Villalobos, S., O. Vargas & S. Melo. 2007. Uso, manejo y conservación de "yosú", *Stenocereus griseus* (CACTACEAE), en la alta Guajira Colombiana. *Acta Biol. Colombiana* 12:99-112.