

## Sustancias Naturales: Alternativa para el Tratamiento de Agua del Río Magdalena en Palermo, Colombia

Sonia E. Aguirre<sup>(1,2)\*</sup>, Nelson V. Piraneque<sup>(1)</sup> y Rosmery K. Cruz<sup>(1,2)</sup>

(1), Universidad del Magdalena, Facultad de Ingeniería Grupo de Investigación Suelo, Ambiente y Sociedad, Carrera 32 No. 22 - 08, Santa Marta-Colombia. (e-mail: [npiraneque@unimagdalena.edu.co](mailto:npiraneque@unimagdalena.edu.co))

(2) Universidad del Magdalena, Facultad de Ingeniería, Programa de Ingeniería Ambiental y Sanitaria, Carrera 32 No. 22 - 08, Santa Marta-Colombia. (e-mail: [saguirre@unimagdalena.edu.co](mailto:saguirre@unimagdalena.edu.co); [rosmerycruzko@miunimagdalena.edu.co](mailto:rosmerycruzko@miunimagdalena.edu.co))

\* Autor a quien debe ser enviada la correspondencia

Recibido Ago. 29, 2017; Aceptado Nov. 7, 2017; Versión final Dic. 11, 2017, Publicado Jun. 2018

### Resumen

El estudio determinó el capacidad de sustancias naturales de Moringa, Cactus, Neem y Maíz en el tratamiento del agua del río Magdalena que consumen las comunidades del corregimiento de Palermo, en Colombia. Por medio de la prueba de jarras, se establecieron las dosis óptimas de coagulante, tiempo y velocidad de floculación. El sulfato de aluminio ( $0.02 \text{ g L}^{-1}$ ) se utilizó como control. Los resultados mostraron que Moringa ( $2\text{g L}^{-1}$ ) redujo la turbidez en 96.8% y el color en 97.8% mientras que el control logró 95.7% y 96.5%, respectivamente. Por otro lado, el tratamiento con Neem ( $0.8\text{g L}^{-1}$ ) disminuyó 99.4% de los coliformes totales y 99.2% de los coliformes fecales mientras que el Maíz ( $2.5\text{g L}^{-1}$ ), redujo 94.4% de los coliformes totales. El uso de sustancias naturales es una alternativa asequible y sostenible de potabilización del agua del río Magdalena.

*Palabras clave:* tratamiento de agua; sustancias naturales; *Moringa oleifera*; *Opuntia ficus-indica*; *Azadirachta indica*; *Zea mays*

## Natural Substances: Alternative for the Treatment of Magdalena River's Water in Palermo Colombia

### Abstract

The study determined the capability of natural substances such as Moringa, Cactus, *Neem* and Corn on the treatment of water from Magdalena river, water used by communities in the municipality of Palermo in Colombia. Through jars tests, optimal doses of coagulant, time and flocculation rate were established, aluminum sulfate ( $0.02 \text{ g L}^{-1}$ ) was used as control. The results showed that Moringa ( $2\text{g L}^{-1}$ ) attenuated in 96.8% the turbidity and 97.8% of color while the conventional one obtained 95.7% and 96.5%, respectively; In turn, *Neem* ( $0.8\text{g L}^{-1}$ ) decreased 99.4% total coliforms and 99.2% of fecal coliforms. Also, Corn ( $2.5\text{g L}^{-1}$ ), reduced 94.4% of total coliforms. The use of natural substances is a feasible and sustainable alternative to water purification of the Magdalena river.

*Keywords:* water treatment; natural substances; *Moringa oleifera*; *Opuntia ficus indica*; *Azadirachta indica*; *Zea mays*

## INTRODUCCIÓN

La Organización Mundial de la Salud (2015) señala que 663 millones de personas utilizan agua de fuentes no mejoradas, es decir, agua de superficie, de pozos excavados y de manantiales no protegidos. De acuerdo con la OMS, el 93% de las personas que aprovechan estas aguas viven en zonas rurales. Si a lo anterior se suma los efectos de la variabilidad climática, el crecimiento demográfico y la demanda del recurso para uso doméstico y productivo, se incrementa la necesidad de utilizar fuentes alternativas. A pesar que han surgido tecnologías para el tratamiento de agua, en Colombia existen territorios con limitaciones y sin acceso a sistemas de potabilización.

El agua cruda proveniente de fuentes no mejoradas arrastra partículas coloidales que generan turbidez por sedimentos y nutrientes, los cuales no se precipitan por sí solos. De igual manera, estos elementos se convierten en vehículo de dispersión de patógenos que afectan la salud de los menores de cinco años, principalmente (Joshi y Sahu, 2014). Por esta razón, la clarificación del agua, entendida como el retiro de los materiales sólidos y coloidales, es fundamental en el proceso de potabilización del agua (Restrepo, 2009). Este proceso incluye tres fases: la coagulación, en la cual se agregan sustancias para reducir la carga de los iones y aglutinar los sólidos en suspensión presentes en el agua; la floculación, que consiste en la acumulación, por gravedad y filtrado, de partículas llamadas flóculos, generadas a partir de la fase anterior; y finalmente la sedimentación, en la cual gracias al uso de agentes químicos y/o biológicos se retiran las pequeñas partículas portadoras de bacterias que generan el color y la turbiedad del agua.

De acuerdo con Ledó, et al. (2009) el sulfato de aluminio es uno de los coagulantes comerciales más usados. En este proceso es importante regular el pH, para lo cual se emplea cal viva, hidróxido de calcio, carbonato de sodio, hidróxido de sodio, ácido sulfúrico y ácido clorhídrico, entre otros. Para Torres, Cruz y Patiño (2009) este es un parámetro primordial en la selección de la dosis y el tipo de coagulante que afecta la solubilidad de los precipitados formados por hierro y aluminio, así como el tiempo requerido para formar flóculos y la carga de las partículas coloidales. En la fase de coagulación, la adición de sustancias químicas metálicas representa riesgo para la salud. Según Costa, et al. (2008) el sulfato de aluminio (alumbre), uno de los compuestos más utilizados, se asocia con la enfermedad de Alzheimer. Por otro lado, Miller et al. (2008) plantean que la exposición a concentraciones mayores a  $0,1 \text{ mg L}^{-1}$  de aluminio genera toxicidad en el agua y por ello, no deben ser utilizados. Este tipo de desventajas ha sido reportado para las sales de hierro y los polímeros artificiales.

El río Magdalena es el principal sistema fluvial de Colombia. Recorre el país de sur a norte con una extensión de 1612 km y un promedio de caudal de  $7100 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ , el área tributaria de la cuenca es de 273438  $\text{km}^2$  que corresponden a 23.8% de la superficie total del territorio nacional de la que hacen parte 20 departamentos en los que habitan 33.6 millones de personas; comprende 151 sub cuencas con más de 500  $\text{km}^2$  y desemboca al océano Atlántico en Bocas de Ceniza a 7,5 km de la ciudad de Barranquilla donde deposita 500000  $\text{m}^3$  de sedimento por trimestre (Restrepo, 2015). Con 2050 mm de precipitación promedio, el régimen de lluvias de la cuenca es bimodal con eventos lluviosos en mayo a abril y de octubre a noviembre. Por su geografía y orografía, en la cuenca se detecta alta gama de condiciones hidrológicas con todas las clases de ríos conocidos. Según su perfil altitudinal, la cuenca se encuentra dividida en tres partes que a su vez presentan numerosas subdivisiones: Cuenca alta, desde el nacimiento, hasta los rápidos de Honda; cuenca media, desde Honda, hasta la desembocadura del río Cesar en el Banco; y cuenca baja, desde el Banco hasta la desembocadura del río en Bocas de Ceniza. En este tramo el cauce discurre por la llanura del Caribe siguiendo una pendiente muy suave y adquiere su carácter de complejo fluvial lacustre al formar innumerables ciénagas que actúan como reguladoras de las crecientes al almacenar agua en los períodos lluviosos y devolverlas al río en los secos (Restrepo, 2015).

Como resultado de la gran diversidad de ecosistemas y actividades económicas que se desarrollan en la cuenca, la vulnerabilidad de algunos sectores genera incertidumbre y preocupación al evidenciarse transformación y modificación en procesos biofísicos esenciales para su funcionamiento, se evidencia erosión, contaminación y cambios del flujo hídrico, entre otros, que sumado al déficit de fuentes de información de los sistemas de servicios públicos domiciliarios (acueducto y alcantarillado), aumenta la inestabilidad del territorio al tener más de 128 municipios ribereños que vierten sus aguas servidas sin tratamiento al río, a lo que se suman los intensos procesos mineros de oro donde solo 15 % de las explotaciones, tienen control (Procuraduría Delegada para Asuntos Ambientales y Agrarios - PDAAA, 2016).

La calidad de agua para consumo se asocia con la salud de las personas, toda vez que el líquido, si está contaminado, puede afectar el normal funcionamiento del organismo humano (Torres et al., 2009). Por esto, los Ministerios de la protección social y del ambiente, vivienda y desarrollo territorial, expedieron la resolución 2115, en la que se generó un indicador del grado de ocurrencia de enfermedades relacionadas con el no cumplimiento de las características físicas, químicas y microbiológicas del agua para consumo humano denominado IRCA (Índice de Riesgo de la Calidad del Agua) calculado a partir de parámetros establecidos, a

los que se otorgan puntajes con los cuales se construye el índice. Este monitoreo, realizado por las autoridades de salud departamental, establece un puntaje de riesgo a cada característica que no cumpla los valores aceptables establecidos en la resolución. Así, IRCA de 80.0 a 100 es Inviabile sanitariamente, que se traduce en agua no apta para consumo humano; IRCA de 35.1 a 80, presenta riesgo alto siendo agua no apta para consumo humano; IRCA de 14.1 a 35, presenta riesgo medio, agua no apta para consumo humano; IRCA 5.1 a 14, presenta riesgo bajo y es agua no apta para consumo humano, pero susceptible de mejoramiento; IRCA de 0 a 5, no presenta riesgo y el agua es apta para consumo (INS, 2015).

De acuerdo con el INS (2015), el IRCA del agua en la bocatoma del Municipio de Sitio Nuevo- Magdalena para los años 2008 – 2014 mostró valores que van de 80.8% al 100%, donde de forma constante se verifica el incumplimiento de la norma para varios parámetros evaluados como Cloro Residual Libre, Coliformes Totales, Coliformes Fecales, Color aparente, Fosfatos, Hierro total y Turbiedad, que ponen de manifiesto que el agua que consume la población de Palermo es inviable sanitariamente, lo que indica muy altos riesgos para la salud humana. En la resolución 2012 expedida por la Gobernación del Magdalena – Colombia, enfatiza la necesidad de adoptar medidas de emergencia, toda vez que los parámetros reportados por el municipio de Sitio Nuevo (Tabla 1) registran niveles por encima de los valores máximos admisibles estipulados en la resolución 2115 de 2007 (INS, 2015)

Ante esta problemática, existen alternativas más sostenibles para el tratamiento de agua, en las cuales se utilizan materiales como la arcilla (bentonita), el carbón activo y algunos extractos de especies vegetales. De acuerdo con Pritchard et al. (2009) estos materiales tienen la capacidad de metabolizar e inmovilizar ciertos compuestos contaminantes, depurar el agua, el suelo y el aire, y reducir el riesgo de toxicidad. Existen reportes que algunos de estos materiales eran usados desde el antiguo Egipto, donde se reposaba el agua en vasijas de arcilla para precipitar impurezas y mediante un sifón extraían el líquido de la parte superior (decantación), en ocasiones se les incorporaban sustancias minerales o vegetales para facilitar el proceso.

De acuerdo con Joshi y Sahu (2014) los habitantes de regiones de difícil acceso y de bajas condiciones socioeconómicas utilizan los coagulantes naturales para la clarificación del agua. Por su parte, Antov et al. (2007), y Guzmán et al. (2013) plantean que la *Moringa oleifera*, la *Jatropha curcas*, el *Hibiscus sabdariffa*, el *Prunus pérsica*, la *Vicia faba*, el *Phaseolus vulgaris*, la *Opuntia ficus* y los hongos *Pleurotus tuberregium* y *Sclerotium sp.*, pueden ser empleadas en el tratamiento del agua. De igual manera, Beltrán et al. (2011) sostienen que la coagulación con la cationización de taninos naturales de la semilla y la corteza de los árboles de *Acacia mearnsii*, *Schinopsis Quercus ilex*, *Q. suber*, *Q. robur*, *Castanea* y *Pinus*, es una estrategia con resultados promisorios para purificar el agua de consumo. Esto resulta de interés para investigadores situados en el trópico, donde la tasa fotosintética es mayor a otras latitudes y se favorece la fijación de metabolitos, lo que representa mayor eficiencia en la decantación. En este contexto, el presente estudio tiene como objetivo evaluar el efecto del uso de sustancias extraídas de las semillas de *Moringa oleifera* Lam, *Opuntia ficus-indica*, *Azadirachta indica* A. Juss y *Zea mays* L., sobre las características del agua del río Magdalena que los habitantes de Palermo, Magdalena, utilizan para su consumo.

Tabla 1: Características del agua del río Magdalena en la Bocatoma del Municipio Sitio Nuevo 2014

PARÁMETROS	UNIDAD	VALOR	
		Según norma	En Bocatoma
PARÁMETROS QUÍMICOS			
As	mg L <sup>-1</sup>	0.010	1.490
Cr	mg L <sup>-1</sup>	0.050	0.031
Hg	mg L <sup>-1</sup>	0.001	0.010
Ca	mg L <sup>-1</sup>	60.000	95.800
Fe	mg L <sup>-1</sup>	0.300	6.220
Mn	mg L <sup>-1</sup>	0.100	0.350
NO <sub>2</sub>	mg L <sup>-1</sup>	0.100	1.100
Sb	mg L <sup>-1</sup>	0.020	0.016
Ba	mg L <sup>-1</sup>	0.700	0.017
Cd	mg L <sup>-1</sup>	0.0030	0.007
Cu	mg L <sup>-1</sup>	1.000	0.236
Ni	mg L <sup>-1</sup>	0.020	0.297
Pb	mg L <sup>-1</sup>	0.010	0.107
Se	mg L <sup>-1</sup>	0.010	<0.001

Tabla 1: Continuación.

Trihalometanos totales	mg L <sup>-1</sup>	0.200	<0.20
Al	mg L <sup>-1</sup>	0.200	0.029
Mo	mg L <sup>-1</sup>	0.070	0.233
fosfatos	mg L <sup>-1</sup>	0.500	0.246
COT	mg L <sup>-1</sup>	5.000	1.467
Plaguicidas	µg L <sup>-1</sup>	0.000	ND
Methyl paration	µg L <sup>-1</sup>	0.000	ND
Ethyl paration	µg L <sup>-1</sup>	0.000	ND
Hidrocarburos Aromáticos Poli cíclicos - HAP	mg L <sup>-1</sup>	0.010	<0.01
Fluoreno	µg L <sup>-1</sup>	0.000	0.468
Fluoranteno	µg L <sup>-1</sup>	0.000	ND
PARÁMETROS MICROBIOLÓGICOS			
<i>Vibrio cholerae</i>	Ausencia/presencia	Ausencia	Ausencia
Aerobios mesófilos	UFC/100 cm <sup>3</sup>	100	>100
<i>Pseudomona aeruginosa</i>	Ausencia/presencia	Ausencia/presencia	Presencia
<i>Giardia lamblia</i>	Ausencia/presencia	Ausencia/presencia	Ausencia
<i>Cryptosporidium</i>	Ausencia/presencia	Ausencia/presencia	Ausencia

Fuente: Gobernación del Magdalena. Resolución No. 2012, 2014

## METODOLOGÍA

Se describe la ubicación de la investigación, la obtención de extractos a partir del material vegetal usado, se describe el procesamiento realizado para determinar la actividad coagulante y su optimización y la actividad desinfectante. Se explica finalmente el análisis estadístico realizado.

### Ubicación

La investigación se desarrolló en el laboratorio de aguas de la Universidad del Magdalena, Santa Marta, Colombia. La recolección de las muestras de agua provenientes del río Magdalena, se llevó a cabo en el corregimiento de Palermo, municipio de Sitio Nuevo – Departamento del Magdalena a 21 km de su desembocadura en el mar Caribe y con coordenadas geográficas latitud 10.952602, longitud 74.750120 (Figura 1). Estas muestras se tomaron en potes plásticos previamente desinfectados con agua caliente y luz ultravioleta, lo cual se hizo siguiendo un muestreo no probabilístico en época de lluvia y seca. Finalmente, las muestras se trasladaron al laboratorio de aguas de la Universidad del Magdalena, donde fueron caracterizadas en cuanto a sus propiedades fisicoquímicas y biológicas (pH, color, turbidez y contenido de coliformes totales y fecales).

### Obtención de extractos

Con el fin de preparar el extracto, se recolectaron semillas de *Moringa oleifera* (Moringa) *Zea mays* (Maíz) y *Azadirachta indica* (Neem) del área de estudio. Posteriormente, estas semillas se despulparon y secaron al sol para obtener la almendra, la cual fue macerada y tamizada (0.5 mm). Para extraer el componente activo del material vegetal se siguió la metodología propuesta por Somani et al. (2011), en la cual el aceite de la semilla se obtiene a partir de suspensiones de 5% (p/v) previamente pulverizadas en etanol por 30 minutos y decantada por una hora. Luego, el sobrenadante se eliminó y la fracción de sólidos resultante se secó a temperatura ambiente. A continuación, se realizaron disoluciones utilizando NaCl (0.5 M), las cuales se agitaron durante una hora eliminando los sólidos a través de filtro de celulosa y consiguiendo el extracto crudo salino. Las cutículas de los tallos de la tuna (*Opuntia ficus*), se cortaron en pequeñas tiras y se secaron a 60 °C durante 48 horas. Luego, con ayuda de un mortero, se tritaron y tamizaron. Una vez obtenidas las partículas finas, se procedió a realizar la extracción en soxhlet con etanol al 96% como solvente y el secado (a temperatura ambiente) del extracto crudo obtenido.

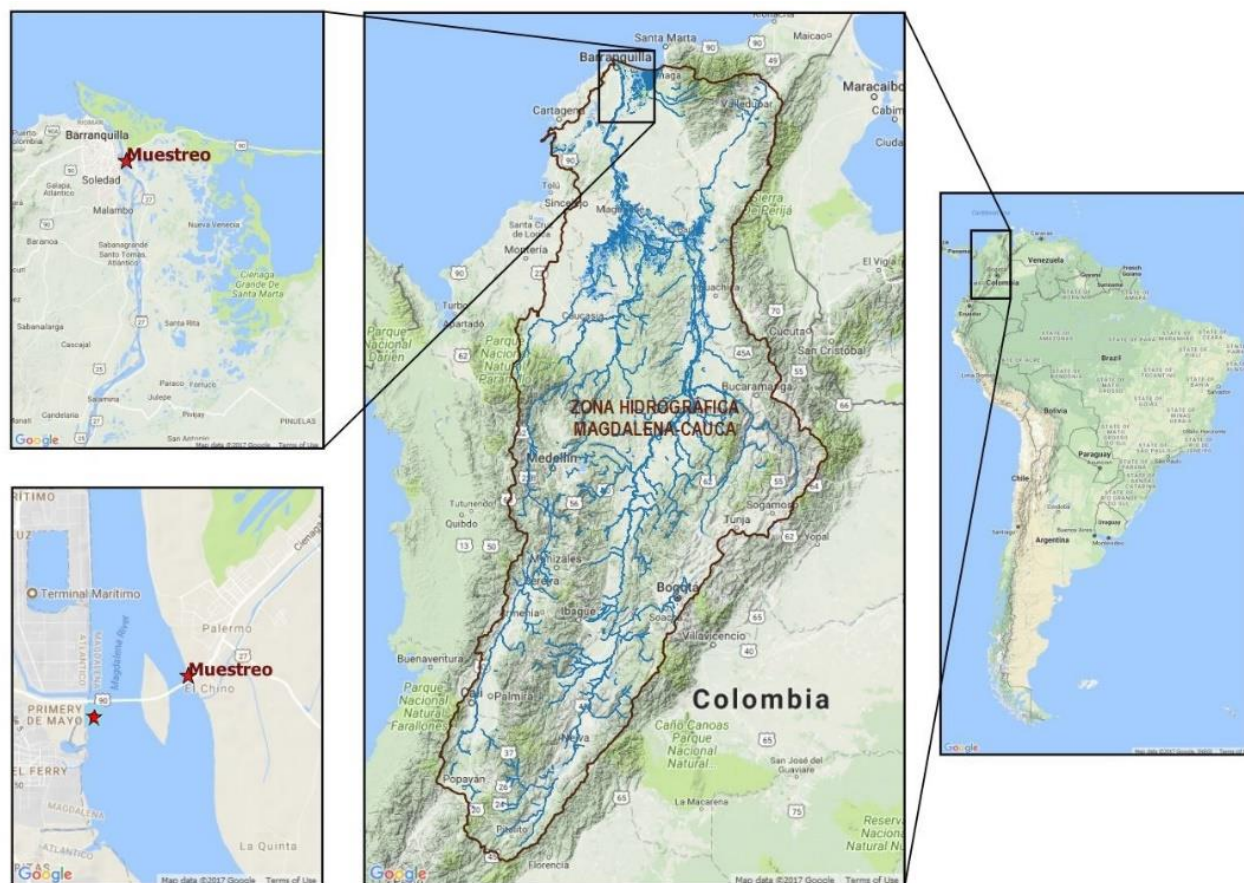


Fig. 1. Localización sitios de muestreo de agua proveniente del río Magdalena a la altura del corregimiento de Palermo, Municipio de Sitio Nuevo – Departamento del Magdalena, Colombia.

### Actividad coagulante

Todas las muestras fueron sometidas a diferentes dosis de los extractos vegetales para determinar su efecto sobre la calidad del agua del río Magdalena. Este proceso fue llevado a cabo siguiendo un modelo de ensayo y error. Posteriormente, los mejores tratamientos fueron seleccionados y evaluados por medio de la simulación de una planta de agua a escala de laboratorio, con la ayuda del equipo modelo E&Q 4554-F6300T, conocido como prueba de jarras. A partir de la evaluación realizada a las muestras de 600 mL de agua se determinaron las dosis óptimas de los coagulantes provenientes de los extractos crudos salinos de las especies, el tiempo y la velocidad óptima de floculación. Inicialmente se trabajó con 11 dosis de extracto de *M. oleifera*, *A. indica*, *Z. mays* y *O. ficus indica* (0.02, 0.05, 0.1, 0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 1, 1.5, 2, 2.5 g L<sup>-1</sup>). De estas dosis, se seleccionaron tres de cada uno de los materiales que mostraron mayor reducción en los parámetros de interés (turbidez, color, coliformes totales y coliformes fecales) sin afectación significativa del pH. Así mismo, los valores de los parámetros obtenidos a partir del uso de los productos naturales se compararon por triplicado con los resultados obtenidos con el coagulante convencional (tratamiento control), sulfato de aluminio (Al<sub>2</sub>(SO<sub>4</sub>)<sub>3</sub>) en dosis comercial 0.02 g L<sup>-1</sup>, bajo las mismas condiciones de coagulación, floculación y sedimentación de los demás tratamientos. En esta fase, el tiempo de coagulación fue 10 segundos con mezcla rápida de 120 revoluciones por minuto (rpm), floculación de 20 minutos a 45 rpm y sedimentación de 15 minutos.

### Optimización de la actividad coagulante

De acuerdo a lo reportado por Trujillo et al. (2014) y con el fin de obtener las dosis, tiempo de floculación y velocidad óptimas, se realizó un proceso de optimización del tratamiento con las tres dosis seleccionadas por cada material variando tiempo de floculación (30 y 40 minutos) y velocidad (35 y 55 rpm).

### Actividad desinfectante

Para evaluar la actividad desinfectante de los extractos seleccionados, se empleó la técnica de tubos de fermentación múltiples (APHA-AWWA-WEF, 2012) con series de cinco tubos, donde las bacterias fermentadoras de lactosa producen de gas y ácido en 48 horas a 35 °C para coliformes totales y a 44.5 °C

para coliformes fecales empleando caldo Brila (peptona de carne, lactosa, bilis de Buey y verde Brillante) 1.05454.0500 de Merck®, , caldo EC (peptona de caseína, lactosa, mezcla de sales Biliares, cloruro sódico, hidrogenofosfato dipotásico, dihidrogeno- fosfato potásico) 1.10765.0500 de Merck® y Agua estéril, como medios de cultivo.

En el presente estudio se utilizó el método estándar para la evaluación del agua y el agua servida APHA-AWWA-WEF (2012). Para medir la turbidez, se empleó un turbidímetro digital HANNA hi 93703 (0.00 – 1000 FTU) calibrado con soluciones estandarizadas de formazina. El pH se midió con un potenciómetro Metrohm calibrado con soluciones amortiguadoras de pH 7.00 y 4.01. Para evaluar el color se empleó espectrofotómetro Thermo Spectronic GENESYS 10UV. Finalmente, para evaluar la actividad desinfectante respecto a la reducción de coliformes totales y fecales de las tres dosis seleccionadas, se empleó la técnica de tubos múltiples de fermentación M 9221 B y SM 9221 E.

#### *Análisis estadístico de la información*

Los datos se sometieron a un análisis de varianza ( $p < 0.05$ ) y a prueba de comparación de medias de Tukey ( $p < 0.05$ ). Todos los análisis se realizaron con el programa estadístico R versión 3.02 (*R Development Core Team 2015 disponible en: [www.r-project.org](http://www.r-project.org)*) y la versión libre de Infostat 2015.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En la Tabla 2 se evidencia el estado inicial de las muestras obtenidas del río Magdalena. En ella se observa que los valores de turbidez fueron mayores en la época invernal y con alta carga contaminante de coliformes totales y fecales. Estos valores, ratifican lo señalado en el informe presentado por la PDAAA (2016), en el que se sostiene que más del 25% de la población de la cuenca baja del río que utiliza este recurso hídrico, presenta problemas gastrointestinales coincidiendo, además, con lo reportado por Álvarez, Panta, Ayala y Acosta (2008) quienes encontraron altas concentraciones de coliformes, contaminando el agua del río Tulancingo con riesgo potencial para la población que se abastece de sus aguas.

Tabla 2: Algunos parámetros y métodos analíticos empleados para determinar la calidad inicial del agua del río Magdalena

Parámetro	Unidad	Método	Promedio	máximo	mínimo	MVA
Turbidez	Unidades Nefelométricas de turbiedad NTU	Nefelométrico	126.60	179.40	92.30	2.00
Color	Unidades de Platino Cobalto UPC	Espectrofotométrico	2225.4	3343.5	1548.5	15.0
pH	Unidades	Potenciométrico	N.A	8.52	7.41	6.5-9.0
Coliformes Totales	NMP/100 mL	Tubos múltiples de fermentación (APHA et al., 2012)	7275.0	16000.0	1700.0	0.0
Coliformes Fecales	NMP/100 mL		2495.0	9200	210	0.0

N.A - No es correcto realizar promedio en los valores de pH debido a que son magnitudes exponenciales.

MVA: Máximo valor aceptable según Resolución 2115 de 2007 del Ministerio de Ambiente de Colombia

En Colombia, de acuerdo con la Resolución 2115 de 2007 del Ministerio del Ambiente que establece la normativa de calidad de agua para el consumo humano, los parámetros observados en las muestras iniciales están muy alejados del rango permisible. Esta situación puede deberse a que el río atraviesa todo el país y en él confluyen muchos afluentes con alta carga de sedimentos y contaminantes, lo cual aumenta el riesgo de afectar la salud y la calidad de vida de los habitantes ribereños. Lo anterior sugiere que, bajo las condiciones actuales, el agua del río Magdalena no es apta para el consumo humano y por tanto es necesario emprender acciones para su tratamiento.

#### *Actividad Coagulante*

Los resultados que se muestran a continuación fueron obtenidos a partir de los siguientes valores: tiempo de coagulación de 10 s y velocidad de mezcla de 120 rpm; tiempo de floculación de 20 minutos a 45 rpm; y tiempo de sedimentación de 15 minutos. De acuerdo con los resultados de la fase inicial del tratamiento se

determinó que las sustancias obtenidas de las semillas de *M. oleifera*, *A. indica*, *Z. mays* y *O. ficus indica* presentan actividad coagulante. Con dosis de 1.5, 2.0 y 2.5 g L<sup>-1</sup> la *M. oleifera* mostró una reducción de 95 y 92% de turbidez y de color, respectivamente. Estos resultados coinciden con los reportados por Santos et al. (2009) y Feria et al. (2014), quienes estudiaron la actividad aglutinante de la lectina extraída de diferentes tejidos de la *M. oleifera*. Igualmente, se observó que las preparaciones de lectina (cMoL) revelaron actividad coagulante superior al 90% y que son proteínas catiónicas divalentes con masa molar de 13 kDa y puntos isoeléctricos entre 10 y 11. De esta manera el mecanismo de coagulación está vinculado a la absorción y neutralización de las cargas coloidales con un efecto similar al producido por el sulfato de aluminio.

Por su parte, el coagulante obtenido de *O. ficus-indica*, con dosis de 0.02, 0.05 y 0.1 g L<sup>-1</sup>, logró disminuir el 51.3, 52.9 y 57.2% de color, respectivamente, y alrededor del 62% de la turbidez. Este resultado se asemeja a lo reportado por Villabona et al. (2013) quienes lograron remoción de 50% del color y 70% de la turbidez de aguas crudas con presencia de taninos catéquicos, saponinas esteroidales, flavonoides, cumarinas y alcaloides. De igual manera, dichos autores afirman que el contenido del ácido poligalacturónico y de los compuestos algínicos son los que confieren la cualidad coagulante al biomaterial. Al respecto, Guzmán et al. (2013) sostienen que la *Opuntia* retiene cantidades considerables de agua y mucílago con sustancias poliméricas complejas de naturaleza carbohidrato de estructura ramificada (L-arabinosa, D-galactosa, L-ramnosa, D-xilosa y ácido galacturónico) en diferentes proporciones y con propiedades gelificantes.

En el caso de la *A. indica* se logró una reducción de la turbidez de 58.4, 66.8 y 62.6 %, y del color en 47.7, 57.2 y 52.2%, con dosis de 0.6, 0.8 y 1.0 g L<sup>-1</sup>, respectivamente. Desde finales del siglo pasado existen reportes de la utilización de esta especie como coagulante, sin embargo, dichos reportes no contaban con rigor experimental (Megersa, et al., 2014; Yongabi, 2010). Finalmente, el coagulante natural obtenido del *Z. mays* reduce la turbidez y el color en 45 y 35%, respectivamente, con dosis de 1.5, 2.0 y 2.5 g L<sup>-1</sup> (ver Figura 2 y Figura 3). De manera general, ninguno de los tratamientos mostró alteración significativa en el pH.

#### Optimización de la Actividad Coagulante

Para cada tratamiento se ratificaron las dosis, el tiempo y la velocidad óptimos de floculación para cada una de las muestras. La Tabla 3 presenta los resultados obtenidos luego de la intervención de las muestras de agua con cada uno de los materiales.

De acuerdo con lo observado en la Tabla 3, a partir de la dosis de 2 g L<sup>-1</sup> del extracto de las semillas de *M. oleifera*, con tiempo de floculación de 30 minutos y a una velocidad de 45 rpm, se produjo una remoción de la turbidez y el color de 96.8 y 97.8%, respectivamente. El efecto observado en la turbidez coincide con el reportado por Núñez (2007), quien obtuvo una reducción del 96%. Por su parte, Asrafuzzaman et al. (2011) alcanzaron 94.1% y Melo y Turriago (2012) obtuvieron remoción del 84,3%. En conjunto, estos resultados confirman la efectividad de la especie estudiada.

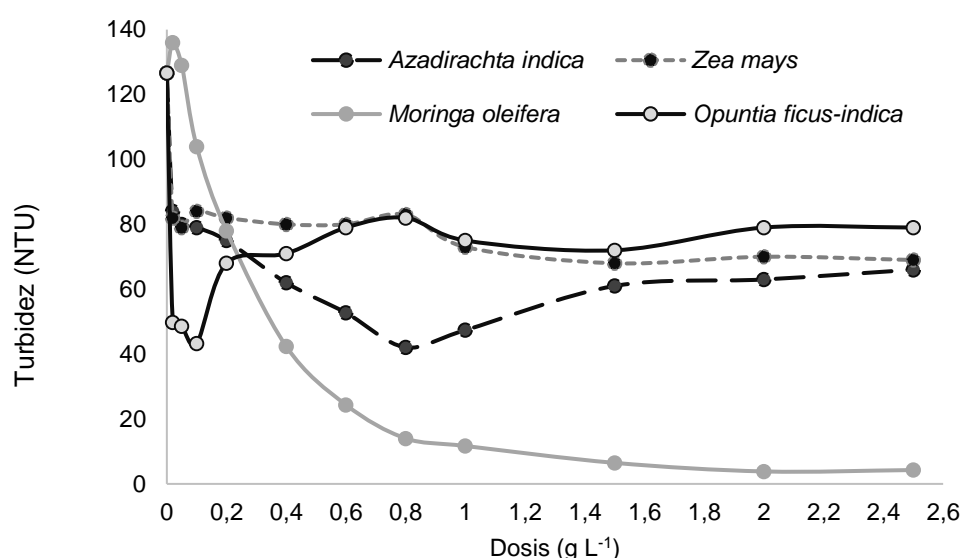


Fig. 2. Comportamiento de la turbidez del agua río Magdalena tratada con coagulantes naturales



Tabla 3: Valores promedio de turbidez, color y conteo de coliformes totales y fecales de agua del río Magdalena obtenidos luego del proceso de optimización de la actividad coagulante de materiales vegetales. Datos analizados con ANOVA y test de Tukey como post hoc. Medias con misma letra dentro del mismo factor en las filas, no presentaron diferencias estadísticas de acuerdo con la prueba de Tukey ( $P \leq 0.05$ )

Parámetro	Valor inicial	Valores posteriores al proceso de optimización				
		<i>M. oleífera</i>	<i>A. indica</i>	<i>Z. mays</i>	<i>O. ficus indica</i>	Sulfato de Al
Turbidez (NTU)	126.6	4.1 C	37.3 B	49.6 A	43.3 A	5.5 C
Color (UPC)	2225.4	48.5 C	653.5 B	1103.5 A	953.5 A	78.5 C
Coliformes totales (NMP/100 mL)	7275.0	490.0 B	45.0 C	410.0 B	2400.0 A	40.0 C
Coliformes Fecales (NMP/100 mL)	2495.0	110.0 BC	20.0 C	410.0 A	250 B	40.0 C

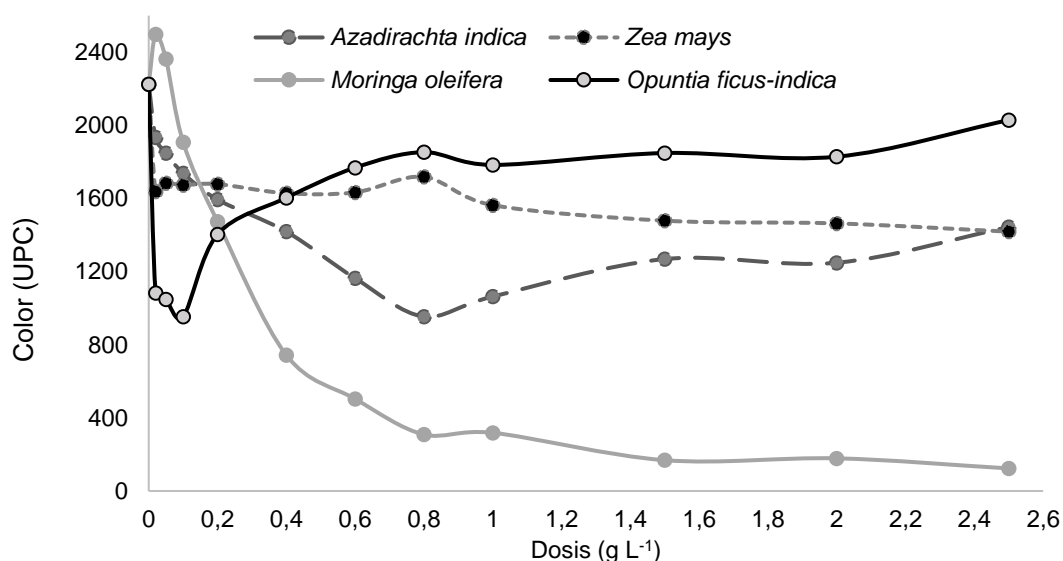


Fig. 3. Comportamiento del color del agua del río Magdalena tratada con coagulantes naturales

Con relación al extracto de las semillas de *A. indica*, se demostró actividad coagulante con remociones de 70.6% de color y turbidez en condiciones de floculación de 45 minutos de retención a velocidad de mezcla de 45 rpm con dosis de extracto de 1 g L<sup>-1</sup>. Mientras que para la especie *O. ficus indica*, la sustancia coagulante obtenida logró reducir en 65.8 y 57.2% la turbidez y el color, respectivamente, a partir de dosis de 0.1 g L<sup>-1</sup> y tiempo de floculación de 20 minutos a 45 rpm. Este hallazgo corrobora los índices de remoción de turbidez encontrados por Olivero et al. (2013) con 93.3%, Rani y Jadhav (2012), con 91.14%, Martínez y González (2012) con 85.75%, y Villabona et al. (2013) con el 72%. Finalmente, el extracto obtenido de la semilla de *Z. mays*, con un tiempo de floculación de 30 minutos, una velocidad de 45 rpm y una dosis de 2.5 g L<sup>-1</sup>, logró una disminución de la turbidez y el color del 60.8 y 50.4%, respectivamente. Estos resultados son superiores a los reportados por Sotheeswaran et al. (2011) quienes reportan un porcentaje de remoción de turbidez del 19%.

#### Actividad desinfectante

Luego del tratamiento de las muestras de agua, se observó que *A. indica*, logró disminución del 99.4 y 99.2% de los coliformes totales y fecales, respectivamente. Este resultado superó al obtenido por Joshi y Sahju (2014), quienes reportaron 95% en reducción de coliformes totales en agua de río tratada con *A. indica*, luego de 12 horas de duración del experimento. En el caso de los coliformes fecales, Somani et al. (2011) reportan que el tratamiento con 1% de extracto de *A. indica*, durante 30 minutos como tiempo de contacto de la sustancia con los organismos, alcanzó 71,79% de remoción, porcentaje que es superado por el obtenido en la presente investigación. Estos resultados muestran una alta capacidad del material como desinfectante en el tratamiento del agua.



Con respecto a la utilización de la especie *Z. mays*, utilizando una concentración de 2.5 g L<sup>-1</sup> se obtuvo una disminución de los coliformes totales y fecales del 94.4 y 83.6%, respectivamente. Este resultado puede deberse a que, en el test de floculación celular, las semillas de maíz poseen la capacidad de formar agregados celulares sobre las bacterias por lo que purifican el agua. Por su parte la *M. oleifera* redujo coliformes totales en 93.3% y fecales en 95.6%, con lo cual se ratifica su efectividad. Este resultado coincide con lo reportado por Arias-Hoyos et al. (2017), y Asrafuzzaman et al. (2011), quienes encontraron un porcentaje de remoción mayor al 96% en coliformes totales y fecales. Por su parte, Santos et al. (2009) señalaron que el extracto de la semilla de *M. oleifera* es un polipéptido que controla eficazmente diversas bacterias patógenas, incluyendo los aislados resistentes a antibióticos de especies de *Staphylococcus*, *Streptococcus* y *Legionella*. Este polipéptido muestra la característica, sin precedentes, de la combinación de tratamiento de agua y propiedades desinfectantes. La identificación de un principio activo derivado de los extractos de semillas muestra un gran potencial para el tratamiento del agua potable o la desinfección de la piel y las mucosas en entornos clínicos.

En cuanto a los resultados obtenidos a partir del tratamiento con la *O. ficus-indica*, se observó una reducción del 67% en los coliformes totales y 90% en coliformes fecales. Al respecto, El-Mostafa, et al. (2014) demostraron que los compuestos y derivados de cactus naturales tienen propiedades antiinflamatorias, antioxidantes, hipoglucémicas y antimicrobianas. Entre los compuestos identificados se obtienen nueve ácidos fenólicos, 1 flavan-3-ol, 2 flavanonas, 3 flavonoles, 6 flavonas y 2 betacianinas. Así mismo, se calcularon niveles importantes de betanina, ácido quinínico, cirsiolol, acacetina, ácido transcinámico, rutina y naringina. Estos resultados indican que *Opuntia ficus-indica* es una importante fuente dietética de compuestos fenólicos y betalainos con capacidad antioxidante y desinfectante.

Finalmente, al tratar las muestras con el coagulante comercial Sulfato de Aluminio, en dosis 0.02 g L<sup>-1</sup>, se alcanzaron reducciones de 99.5 y 98.4% en coliformes totales y fecales, respectivamente. De esta manera, pese a que este compuesto no es una sustancia desinfectante logró una reducción significativa en el contenido de coliformes, evidenciado en la reducción de la turbidez y el color. Lo anterior coincide con lo señalado por el Instituto Nacional de Salud - INS (2015), quien afirma que la turbidez y el color son parámetros que se relacionan directamente con la carga de partículas y materia orgánica. De igual manera, el INS señala que estos parámetros afectan la eficiencia del tratamiento de desinfección, ya que exigen mayores niveles de concentración de la sustancia desinfectante.

## CONCLUSIONES

De los resultados mostrados, de su análisis y de su discusión, se pueden obtener las siguientes conclusiones, sobre el empleo de sustancias naturales como alternativa para el tratamiento del agua del río Magdalena: 1) Las sustancias naturales obtenidas a partir de las especies *M. oleifera*, *A. indica*, *Z. mays*, y *O. ficus-indica* son efectivas para la remoción de la turbidez y el color del agua recolectada del río Magdalena. El aspecto más relevante es que dichas sustancias presentan estos resultados sin alterar de forma significativa el pH del agua. Por esta razón, su utilización en procesos de tratamiento de agua es una alternativa económicamente viable y ambientalmente sostenible; 2) Con la metodología empleada se ratifica la propiedad coagulante de *M. oleifera*; 3) Las técnicas empleadas permitieron determinar que con el empleo de sustancias provenientes de *A. indica* y de *M. oleifera* se obtienen porcentajes de remoción de coliformes totales y fecales comparables a los obtenidos por sustancias convencionales como el sulfato de aluminio; 4) Los resultados del presente estudio permiten plantear la posibilidad de incluir los materiales vegetales utilizados, como opción alternativa en el tratamiento del agua, con lo que se brinda un beneficio a las comunidades aledañas a las fuentes hídricas que no presentan tratamiento previo a su consumo.

## AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen el apoyo de la Universidad del Magdalena, Al estudiante José Villa y a todos los funcionarios del Laboratorio de Calidad del Agua de la Facultad de Ingeniería.

## REFERENCIAS

- Álvarez, J., Panta, J., Ayala, C., y Acosta, E. Calidad integral del agua superficial en la cuenca hidrológica del Río Amajac, doi: 10.4067/S0718-07642008000600004, Inf. Tecnol. (en línea), 19(6), 21-32 (2008).
- American Public Health Association (APHA), American Water Works Association (AWWA) & Water Environment Federation (WEF). Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, 22nd edition. Washington, DC. (2012).
- Antov, M. G., Sibani, M. B., Adamovis, S. R. y Klasnja, M.T. Investigation of isolation conditions and ion-exchange purification of protein coagulation components from common bean seed, APTEFT, 38, 1-190 (2007).

- Arias-Hoyos, A., Hernández-Medina, J. L., Castro-Valencia, A. F. y Sánchez-Peña, N. E. Tratamiento de aguas residuales de una central de sacrificio: uso del polvo de la semilla de la *M. oleifera* como coagulante natural, doi: 10.18684/BSAA, Biotecnología en el Sector Agropecuario y Agroindustrial, (en línea), 15, 29-39 (2017).
- Asrafuzzaman, M., Fakhrudin, A., y Hossain, M. (2011). Reduction of Turbidity of Water Using Locally Available Natural Coagulants, doi: 10.5402/2011/632189, ISRN Microbiology, (en línea), 1-6. (2011).
- Beltrán, H. J., Sánchez, M. J. y Dávila, M. A. Optimization of the synthesis of a new coagulant from a tannin extract, doi: 10.1016/j.jhazmat.2010.12.075, Journal of Hazardous Materials, (en línea), 186(2-3), 1704-1712 (2011).
- Costa, P., Almeida, K., Magosso, A. y Segura, S. Aluminio como factor de riesgo para la enfermedad de Alzheimer, Rev Latino-am Enfermagem, 16(1),1-7 (2008).
- El-Mostafa, K., El Kharrassi, Y., Badreddine, A., Andreoletti, P., Vamecq, J., El Kebbaj, M. y Cherkaoui-Malki, M. Nopal cactus (*Opuntia ficus-indica*) as a source of bioactive compounds for nutrition, health and disease, doi: 10.3390/molecules190914879, Molecules, (en línea), 19(9), 14879-14901 (2014).
- Feria, J., Bermúdez, S. y Estrada, A. Eficiencia de la semilla *Moringa oleifera* como coagulante natural para la remoción de la turbidez del río Sinú, Producción más limpia, 9(1), 9-22 (2014).
- Guzmán, L., Villabona, Á., Tejada, C. y García, R. Reducción de la turbidez del agua usando coagulantes naturales: una revisión; Revista UDCA Actualidad & Divulgación Científica, 16(1), 253-262 (2013).
- Instituto Nacional de Salud, INS. Estado de vigilancia de la calidad de agua para consumo humano. Colombia: INS, 232p. Bogotá, Colombia (2015).
- Joshi, J. y Sahju, O. *Azadirachta indica* leaves as antibacterial treatment on drinking water, doi:10.12691/ijcn-2-2-3, International Journal of Clinical Nutrition, (en línea), 2(2), 36-40 (2014).
- Ledó, P., Lima, R., Paulo, J. y Duarte, M. Estudio comparativo de sulfato de aluminio y semillas de *Moringa oleifera* para la depuración de aguas con baja turbiedad, doi: 10.4067/S0718-07642009000500002, Inf. Tecnol. (en línea), 20(5), 3-12 (2009).
- Martínez, J. y González, L. Evaluación del poder coagulante de la tuna (*Opuntia ficus indica*) para la remoción de turbidez y color en aguas crudas. Trabajo de grado. Universidad de Cartagena, Cartagena, Colombia (2012).
- Melo, G., y Turriago, F. Evaluación de la eficiencia de la utilización de semillas de *Moringa oleifera* como una alternativa de biorremediación en la purificación superficiales del caño cola de pato ubicado en el sector rural del municipio de Acacias; Tesis de grado, Universidad Nacional Abierta y a Distancia, Villavicencio, Colombia (2012).
- Megersa, M., Beyene, A., Ambelu, A., y Woldeab, B. The use of indigenous plant species for drinking water treatment in developing countries: a review. Journal of Biodiversity and Environmental Sciences, 5(3), 269-281 (2014).
- Miller, S., Fugate, E., Craver, V., Smith, J., y Zimmerman, J. Toward understanding the efficacy and mechanism of *Opuntia* spp. as a natural coagulant for potential application in water treatment, Environmental Science and Technology, 42, 4274–4279 (2008).
- Núñez, E. Validación de la efectividad de la semilla de *Moringa oleifera* como coagulante natural del agua, destinada al consumo humano; Tesis de grado, Escuela Agrícola Panamericana Zamorano, Francisco Morazán, Honduras (2007).
- Olivero, R., Mercado, I. y Montes, L. Remoción de la turbidez del agua del río Magdalena usando el mucílago del nopal *Opuntia ficus-indica*, Producción + limpia, 8(1), 19-27 (2013).
- Organización Mundial de la Salud, OMS. Progresos en materia de saneamiento y agua potable: informe de actualización 2015 y evaluación del ODM (en línea: <https://goo.gl/ifVxKo>, acceso 15 de enero 2017), Unicef OMS (2015).
- Pritchard, M., Craven, T., Mkandawire, T., Edmondson, A.S. y O'neill, J.G. A comparison between *Moringa oleifera* and chemical coagulants in the purification of drinking water. An alternative sustainable solution for developing countries, doi: 10.1016/j.pce.2010.07.014, Physics and Chemistry of the Earth, (en línea), 35, 798-805 (2009).
- Procuraduría Delegada para Asuntos Ambientales y Agrarios. Río Magdalena: Informe Social, Económico y Ambiental. (en línea: <https://goo.gl/Z1aa9W>) Colombia (2016).
- Rani, C y Jadhav, M. Enhancing filtrate quality of turbid water incorporating seeds of *Strychnos potatorum*, pads of *Cactus opuntia* and mucilage extracted from the fruits of *Coccinia indica* as coagulants, Journal of environmental research and development, 7(2), 668-674 (2012).
- Restrepo, J. El impacto de la deforestación en la erosión de la cuenca del río Magdalena (1980-2010), doi: 10.18257/racefyn.141, Rev. acad. colomb. cienc. exact. fis. Nat. (en línea), 39(151), 250-267 (2015).
- Restrepo, O. H. Evaluación del proceso de coagulación–floculación de una planta de tratamiento de agua potable; Tesis de grado, Facultad de Minas, Universidad Nacional de Colombia, sede Medellín, Colombia (2009).
- Santos, A., Luz, A., Argolo, A. C., Teixeira, J. A., Paiva, P. M. y Coelho, L. B. Isolation of a seed coagulant *Moringa oleifera* lectin, doi: 10.1016/j.procbio.2009.01.002, Process Biochem. (en línea), 44, 504-508 (2009).
- Somani, S., Ingole, N. y Patil, S. Performance evaluation of natural herbs for antibacterial activity in water purification, International Journal of Engineering Science and Technology, 3(9), 7170-7174 (2011).

- Sotheeswaran, S., Nand, V., Matakite, M., y Kanayathu, K. *Moringa oleifera* and other local seeds in water purification in developing countries, *Research Journal of Chemistry and Environment*, 15(2), 135-138 (2011).
- Torres, P., Cruz, C. H. y Patiño, P. J. Water quality index in surface sources used in water production for human consumption: A critical review. *Revista Ingenierías Universidad de Medellín*, 8(15), 79-94 (2009).
- Trujillo, D., Duque, L., Arcila, J., Rincón, A., Pacheco, S., y Herrera, O. Remoción de turbiedad en agua de una fuente natural mediante coagulación/floculación usando almidón de plátano. *Rev. ion*, 27(1), 17-34 (2014).
- Villabona, A., Paz, I. y Martínez, J. Caracterización de la *Opuntia ficus-indica* para su uso como coagulante natural, *Revista Colombiana de Biotecnología*, 15(1), 137-144 (2013).
- Yongabi, K. A. Biocoagulants for water and waste water purification: a review, *International review of chemical engineering*, 2(3), 444-458 (2010).

