



# Coagulantes naturales en sistemas de flujo continuo, como sustituto del $Al_2(SO_4)_3$ para clarificación de aguas\*

Natalia Fuentes Molina\*\*, Emiro José Molina Rodríguez\*\*\*, Carla Patricia Ariza\*\*\*\*

*Natural coagulants in continuous flow systems as a substitute of  $Al_2(SO_4)_3$  for water clarification*

*Coagulantes naturais em sistemas de fluxo contínuo, como substituto do  $Al_2(SO_4)_3$  para clarificação de águas*

## RESUMEN

**Introducción.** El agua superficial es de vital importancia como fuente de abastecimiento, sin embargo no todas son aptas para el consumo, haciéndose necesario su tratamiento, mediante la combinación de procesos físicos y químicos que requieren el uso de coagulantes como el sulfato de aluminio; sustancia que cumple eficientemente su función, pero es bio-acumulada por los humanos afectando la salud. **Objetivo.** Evaluar la eficiencia de los coagulantes naturales Moringa Oleífera, Cactus Opuntia, Algas Marinas y Almidón, para la clarificación

de las aguas de consumo humano, como sustituto al sulfato de aluminio en sistemas batch y continuos. **Materiales y métodos.** Se analizaron muestras de agua del Río Cesar, durante periodos seco y lluvioso, representando baja y alta turbiedad. Las biomasas fueron analizadas con y sin pre-tratamientos químicos ( $Ca(OH)_2$ ,  $CaCl_2$ , NaOH y NaCl). Se efectuaron pruebas mediante dos sistemas simulando las fases de coagulación y floculación, utilizando varias dosificaciones. Las variables de control fueron color, turbiedad, OD, ST, conductividad DQO y pH. **Resultados.** Las mayores eficiencias de remoción se presentaron con pre-tratamientos excepto el

\* Artículo derivado de la investigación: "Evaluación de coagulantes naturales para la clarificación de las aguas como sustituto del sulfato de aluminio", realizada en el departamento de La Guajira durante el año 2015. \*\* Magister en Ciencias Ambientales, Docente del programa de Ingeniería Ambiental de la Universidad de La Guajira. \*\*\* Magister en Ciencias Ambientales, Universidad de La Guajira. \*\*\*\* Magister en Gestión Ambiental, Universidad de La Guajira.

cactus; encontrándose 88.26% para moringa usando  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ , 79.73 % para almidón con NaOH; 81.14 % para algas con  $\text{CaCl}_2$  y 98.41 % para cactus siendo la más eficiente. Se obtuvo un eficiente comportamiento del sistema continuo con condiciones similares a las obtenidas del sistema batch. **Conclusiones.** Se determinaron las condiciones óptimas de los

coagulantes naturales, demostrando que son eficientes, seguros y económicos para el tratamiento de aguas, con menor generación de lodos, gracias a los mecanismos de adsorción y neutralización de cargas.

**Palabras clave:** coagulantes naturales, tratamiento de agua, sistema batch y continuo.

## ABSTRACT

**Introduction.** Surface water is most important as a source for supply, but not all of it is suitable for consumption. It is necessary to treat it by combining physical and chemical processes that require the use of coagulants such as the aluminum sulfate, a substance that is efficient but it is also harmful for health, as human beings bio-accumulate it. **Objective.** Evaluate the efficiency of the natural coagulants: Moringa Oleífera, Opuntia cactus, seaweed and starch, to clarify human consumption water, as a substitute of the aluminum sulfate in batch and continuous systems. **Materials and methods.** Water samples from the Cesar river were analyzed during sunny and rainy periods, representing low and high turbidity. The biomasses were analyzed with and without chemical pre-treatments ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ,  $\text{CaCl}_2$ , NaOH y NaCl). Tests were performed by means of two systems

that simulated the coagulation and flocculation stages, with several doses. The control variables were color, turbidity, OD, ST, conductivity, COD and pH. **Results.** The highest removal efficiencies were found with pre-treatments, except with the cactus, finding 88.26% for moringa using  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ , 79.73% for starch with NaOH; 81.14% for algae with  $\text{CaCl}_2$  and 98.41% for cactus, which is the most efficient. An efficient behavior was obtained from the continuous system with similar conditions to those obtained from the batch system. **Conclusions.** The optimal conditions of the natural coagulants were determined, demonstrating their efficiency, safety and economy for water treating, with less mud generation, thanks to the adsorption and load neutralization mechanisms.

**Key words:** natural coagulants, water treatment, batch and continuous system.

## RESUMO

**Introdução.** A água superficial é de vital importância como fonte de abastecimento, mas não todas são aptas para o consumo, fazendo necessário seu tratamento, mediante a combinação de processos físicos e químicos que requerem o uso de coagulantes como o sulfato de alumínio; substância que cumpre eficientemente sua função, mas é bio-acumulada pelos humanos afetando a saúde. **Objetivo.** Avaliar a eficiência dos coagulantes naturais Moringa Oleífera, Cactus Opuntia, Algas Marinhas e fécula, para a clarificação das águas de consumo humano, como substituto ao sulfato de alumínio em sistemas batch e contínuos. **Materiais e métodos.** Se analisaram amostras de água do Rio Cesar, durante períodos seco e chuvosos, representando baixa e alta turvação. As biomassas foram analisadas com e sem pré-tratamentos químicos ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ,  $\text{CaCl}_2$ , NaOH e NaCl). Se

efetuaram provas mediante dois sistemas simulando as fases de coagulação e floculação, utilizando várias dosagem. As variáveis de controle foram cor, turvação, OD, ST, condutividade DQO e pH. **Resultados.** As maiores eficiências de remoção se apresentaram com pré-tratamentos exceto o cactus; encontrando-se 88.26% para moringa usando  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ , 79.73% para fécula com NaOH; 81.14% para algas com  $\text{CaCl}_2$  e 98.41% para cactus sendo a mais eficiente. Se obteve um eficiente comportamento do sistema contínuo com condições similares às obtidas do sistema batch. **Conclusões.** Se determinaram as condições ótimas dos coagulantes naturais, demonstrando que são eficientes, seguros e econômicos para o tratamento de águas, com menor geração de lodos, graças aos mecanismos de adsorção e neutralização de cargas.

**Palavras chave:** coagulantes naturais, tratamento de água, sistema batch e contínuo.

## INTRODUCCIÓN

La solución a la problemática de la falta de acceso al agua potable para países en vías de desarrollo, debe encaminarse al desarrollo de técnicas innovadoras, eficaces, sostenibles, económicas, fiables y fáciles de manejar, que sean socialmente aceptadas por la comunidad, mejorando así su situación sanitaria y calidad de vida (Mintz, Bartram, Lochery, & Wegelin, 2001); a pesar de ser uno de los objetivos de desarrollo del milenio generados en la cumbre mundial de la Organización de las Naciones Unidas (ONU) la disponibilidad y calidad de agua para consumo humano sigue siendo deficiente. Las tecnologías existentes de tratamiento actuales, en la mayoría de los casos representan altos costos de infraestructura y mantenimiento, obstaculizando el cumplimiento de las metas planteadas para la mejora de calidad de vida y provocando problemas de salud a nivel mundial (Gómez, 2010).

La introducción de los coagulantes naturales en los procesos de clarificación de agua para consumo humano como una tecnología apropiada en sectores vulnerables, se hace más que necesario, imprescindible, ante las condiciones económicas actuales en Colombia, donde la producción de Sulfato de Aluminio ( $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ ), como coagulante primario y tradicional para la clarificación, apenas satisface un bajo porcentaje de la demanda nacional (Rodríguez, 2008; Miller, Fugate, Craver, Smith & Zimmerman 2008). Con el fin de reducir el déficit del sulfato de aluminio, se han realizado varias investigaciones con coagulantes y/o ayudantes naturales (Guzmán, Villabona, Tejada, & Garcia, 2013; Molano, 2011; García, 2007; Dorea, 2006); debido a que se ha venido cuestionando en los últimos años el uso de este producto, por el alto costo que implica la potabilización que no satisface la demanda total; las grandes cantidades de lodos que alteran con su toxicidad los procesos naturales presentes en el suelo y el agua; las afectaciones significativas del pH y conductividad del agua tratada, los altos costos de infraestructura, gestión y mantenimiento (Galvis, Ortega & Rondón, 2011; Yin, 2010) sumado a esto, algunos estudios han

concluido que el aluminio residual en el agua de consumo humano puede ser muy peligroso para la salud (Gurdián & Coto, 2011; Parra, Cedeño, García, Medoza, González & Fuentes, 2011; Cabrera, 2009; Bratby, 2006 & Colbert 2007).

Los coagulantes naturales de origen vegetal como Moringa oleífera (Rodiño et al., 2015; Asrafuzzaman, Fakhuruddin, & Alamgir, 2011; Pritchard, Mkandawire, Edmondson, O'Neill & Kululanga, 2010), cactus lefaria (Pichler, Young & Alcantar, 2012; Parra et al., 2011; Nirmala & Jadhav, 2012) almidón de yuca (Rodríguez et al. 2007; Hamidi & Koffly, 1998) y algas marinas (Prado et al. 2011; Kawuamura, 1991); resultan ser biodegradables, económicos, seguros por su compatibilidad con el medio ambiente (Poumaye et al., 2012; Pritchard et al., 2010); gracias a la presencia de proteínas solubles que actúa en el proceso como un polielectrolito catiónico natural (Barth et al., 1982; Jahn, 1988), capacidad que se incrementada cuando se emplean sales inorgánicas como pre-tratamiento (Okuda et al., 1999); No inciden significativamente en los cambios de pH y conductividad del agua después de su tratamiento (Ndabigengesere y Narasiah, 1998) y reducen la presencia de microorganismos (Huda et al., 2012, Ghebremichael et al., 2005).

Si bien es cierto, que los coagulantes naturales de origen vegetal han sido evaluados exitosamente en procesos de clarificación de aguas (Guzmán et al., 2013) debido a su capacidad de remoción de turbiedad, color, materia orgánica, partículas coloidales y microorganismos, sus mecanismos de coagulación con pre-tratamientos no han sido estudiados ampliamente y hay pocas referencias en la literatura sobre resultados del funcionamiento en procesos continuos donde se haya remplazado el sulfato de aluminio por coagulantes naturales.

Por lo anterior en la presente investigación se evaluó la efectividad de los coagulantes naturales de origen vegetal moringa oleífera, cactus lefaria, almidón de yuca y algas marinas como sustituto del sulfato de aluminio para la clarificación de las aguas de consumo humano en sistemas batch y flujo continuo y la influencia

de los pre-tratamientos en el comportamiento de los parámetros físicos y químicos analizados. Información que busca apoyar la toma de decisiones para reorientar el quehacer actual frente a los inconvenientes presentados, por el uso de coagulante metálicos.

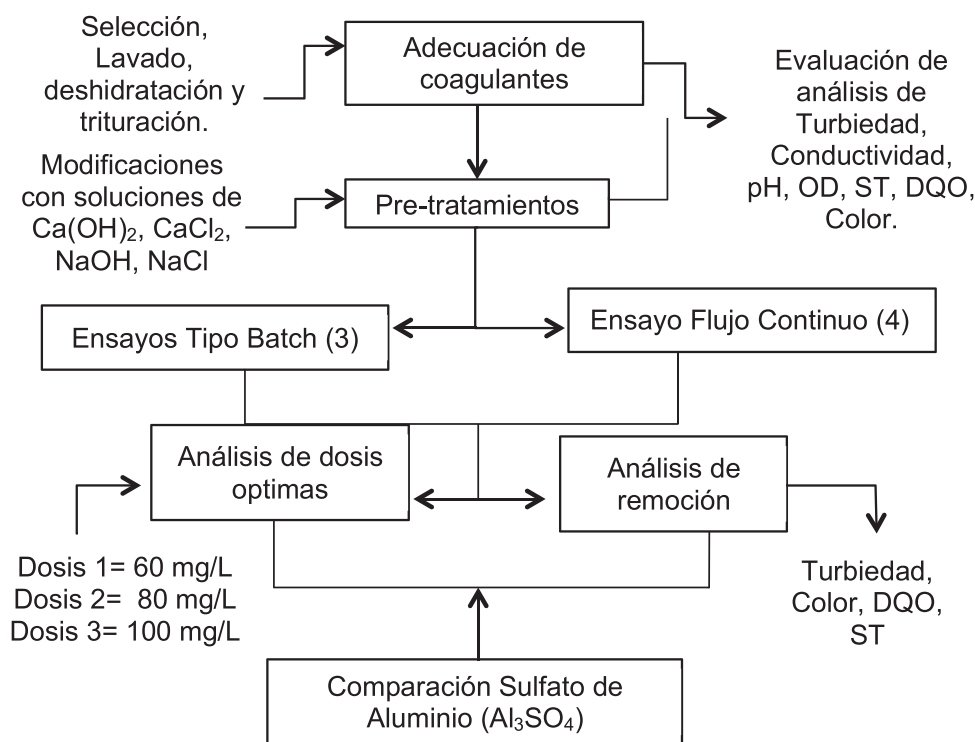
## MATERIALES Y MÉTODOS

La investigación se desarrolló en 4 fases las cuales se resumen en la Figura 1.

**Fase I Análisis de las biomazas como coagulantes naturales:** Se realizó un análisis de los coagulantes naturales seleccionados (según la actividad coagulante, disponibilidad y composición química) moringa oleífera (BM), almidón de yuca (BY), cactus (BC) y

algas marinas rojas (BA), las cuales fueron recolectadas y trasladadas al laboratorio, donde cortaron en trozos pequeños y se lavaron con agua destilada. Luego se secaron a 110°C por 24h para deshidratar la biomasa y proceder a pulverizarlas hasta su completa desintegración y tamizada hasta diámetro de partícula igual o inferior a 1mm (Martínez y González, 2012; Solís, Laines & Hernández, 2012).

**Fase II Análisis de los pre-tratamientos aplicados a los coagulantes naturales para aumentar eficiencia de coagulación:** Se trabajaron disoluciones con concentraciones 0,2M de  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ,  $\text{CaCl}_2$ ,  $\text{NaOH}$  y  $\text{NaCl}$ , para lavar los coagulantes naturales y agua destilada para eliminar los residuos de cada una de las sustancias (Villanueva y Tapia, 2007); luego fueron secados y pulverizados.



**Figura 1. Fases del análisis experimental de los coagulantes naturales (Moringa Oleífera, Cactus, Almidón de yuca y Algas) y Sulfato de Aluminio**

Fuente: elaborado por los autores

### Fase III Determinación de dosis óptima y eficiencia de remoción de coagulantes naturales en ensayos tipos batch:

La determinación de dosis óptimas de los cuatro coagulantes naturales capaces de remover las máximas turbiedades, se realizó con 144 ensayos con diferentes dosificaciones para estudiar la influencia de variables tales como el pre-tratamiento de la biomasa con diferentes soluciones de sodio y calcio, permitiendo evaluar el efecto del coagulante natural sobre el cuerpo de agua (Díaz, Arias, Gelvez, Maldonado, Laverde, 2003; Solís *et al.*, 2012). Una vez tomada la muestra de agua en el río Cesar departamento de La Guajira Colombia y medidos los valores iniciales de los parámetros de turbiedad, color, pH y DO, color, sólidos y DQO se llevó a cabo el proceso de coagulación-floculación mediante el equipo de prueba de jarras marca Phipps & BirdMR, modelo PB-700 (NTC, 3903). En cada vaso se procedió a agregar las diferentes soluciones de los coagulantes naturales y químicas ( $Al_2(SO_4)_3$ ), con las siguientes concentraciones (60, 80 y 100 mg/L).

Agregado el coagulante, se llevó a cabo un mezclado utilizando standard methods of the American Public Health Association ASTM D 2035-08 (APHA, 2005) que consiste en una mezcla rápida por 1 minuto a 200 rpm, a fin de desestabilizar las cargas superficiales de las partículas de la materia orgánica contenida, seguida de una mezcla lenta por 25 minutos a 25 rpm para promover la formación de flóculos. Después se dejó sedimentar por un tiempo de 30 min. Se midieron los valores finales de los parámetros evaluados en las condiciones iniciales.

### Fase IV Procesos de flujo continuo mediante unidades secuenciales de operación con los bio-coagulantes:

A partir de los resultados obtenidos en los ensayos batch (mayor eficiencia y dosis óptimas) y basados en la respectiva revisión bibliográfica, se realizaron los ensayos de remoción de los coagulantes naturales a flujo continuo; en módulos cilíndricos de polietileno, cuyas dimensiones fueron 30 cm de altura y 5 cm de diámetro interno, donde se evaluó la influencia de los factores pre-tratamientos con las sales, dosificaciones (60, 80

y 100 mg L<sup>-1</sup>), concentración de entrada (40.8 y 800 NTU), flujo del sistema (20 y 30 mL min<sup>-1</sup> 0, 80 y 100 mg L<sup>-1</sup> on una bomba) a los módulos y concentración de salida colectadas en intervalos periódicos de tiempo establecidos para verificar las eficiencias. El agua colectada en el río Cesar fue bombeada con flujo ascendente con una bomba peristáltica Pulsafeeder modelo pulsatron serie Aplus 3919/2010. Se realizaron ensayos a diferentes caudales y tiempos de retención para determinar así los valores óptimos de remoción.

## RESULTADOS

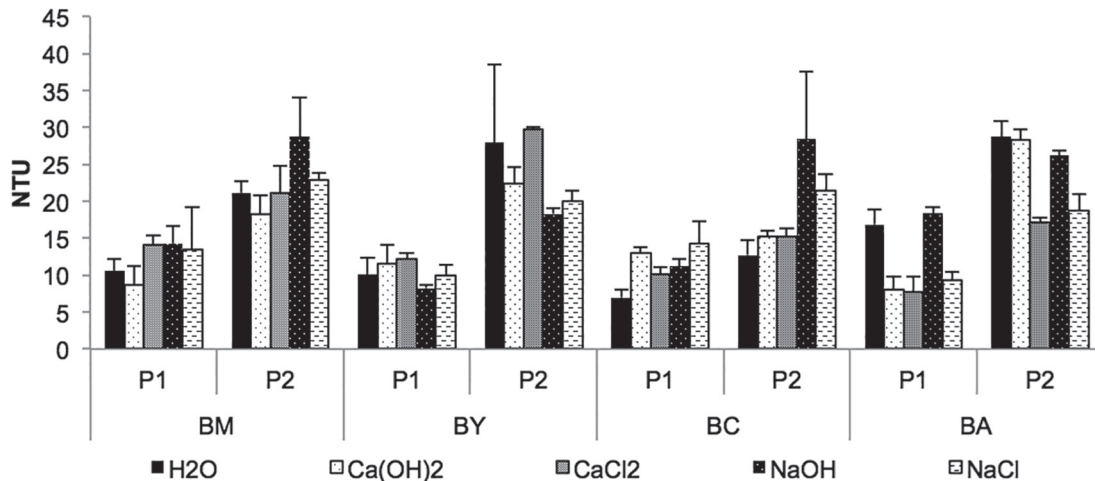
Se determinaron las condiciones iniciales (previas al tratamiento) de las seis muestras de aguas colectadas en el río Cesar, encontrando los siguientes valores de turbiedad (40.8 y 800 NTU), pH (6.87 y 6.93 unidades), oxígeno disuelto (6.42 y 7.76 mgO<sub>2</sub>/L), conductividad (71.10 y 101.30 μ/cm), sólidos totales (1154.20 y 4062.50 mg/L), DQO (64 y 224 mgO<sub>2</sub>/L) y color 105 y 135 UPC para los periodos seco y lluvioso respectivamente.

### Pre-tratamiento de los coagulantes naturales en sistemas tipo batch:

Los resultados obtenidos mediante ensayos en procesos tipo batch muestran que las concentraciones finales de turbiedad más bajas, se presentan con la aplicación de pre-tratamientos con la solución de Ca(OH)<sub>2</sub> para la Moringa Oleífera (8.62 y 18.27 NTU), NaOH para el almidón de yuca (8.27 y 18,33 NTU), CaCl<sub>2</sub> para las algas marinas (7.69 y 17.17 NTU) y sin pre-tratamiento (H<sub>2</sub>O), para el cactus opuntia (6.98 y 12.73 NTU) en los periodos seco y lluvioso respectivamente (figura 2).

La conductividad se mantiene estable, después de realizados los ensayos en sistemas tipo batch con y sin pre-tratamiento, encontrándose que no existen cambios o alteraciones representativas en su valor con un intervalo que osciló entre 83.63 y 114.97 μ/cm, donde los resultados están por debajo de los límites permisibles establecidos en la normativa colombiana.





**Figura 2.** Turbiedad (NTU $\pm$ DE) de las biomazas evaluadas: (BM) Moringa Oleífera, (BY) Almidón de Yuca, (BC) Cactus Opuntia, (BA) Algas Marinas en los periodos seco (P1) y lluvioso (P2); donde las barras representan la magnitud promedio de las concentraciones de turbiedad y las líneas acotadas la desviación estándar por encima de la media

Fuente: elaborado por los autores

Se presentó un comportamiento estable de pH durante los ensayos en sistemas tipo batch de los coagulantes naturales modificados con los pre-tratamientos mencionados, manteniendo valores que oscilaron entre 6.99 y 7.94 unidades, los cuales se encuentran dentro de los límites permisibles establecidos por la normatividad colombiana vigente.

En los valores de oxígeno disuelto de manera general se observa un comportamiento estable en todos los ensayos realizados con sistema tipo batch, manteniendo valores entre 6.06 y 7.81 mg/L, lo cual indica que no existe actividad representativa en este parámetro. En los ensayos se observan las concentraciones finales de color más bajas para moringa (29 y 35 UPC), seguidas de algas marinas (31 y 30 UPC), almidón de yuca (31 y 36 UPC), y cactus (42 y 43 UPC).

**Determinación de dosis óptima y eficiencia de remoción de coagulantes en sistemas tipo batch:** Se evidenció la efectividad del coagulante extraído de la moringa (5.65 y 15.9 NTU) y el almidón de yuca (7.82 y 17.5 NTU) alcanzando los mejores valores de turbiedad con la dosis de 60 mg/L, valores que corresponden a

remociones promedio de 98.01; el cactus (5.95 y 10.5 NTU) presentó las mayores eficiencias con remociones del 98,69% para la dosis de 100 mg/L y las algas marinas no presentaron variaciones relevante con la implementación de las diferentes dosis suministradas, logrando porcentajes de remociones cercanos al 98%. El sulfato de aluminio (3.17 y 1.44 NTU) demuestra una vez más su potencial como coagulante reflejando los mejores porcentajes (95 y 99%) de remociones con dosis óptima de 60 y 100 mg/L para los periodos seco y lluvioso respectivamente. Se observan excelentes remociones de turbiedad, convirtiéndose los coagulantes naturales en potenciales ayudantes y/o co-ayudantes en los procesos de potabilización del agua.

**Procesos de flujo continuo mediante unidades secuenciales de operación para la remoción de la carga orgánica con los bio-coagulantes:** El caudal de operación del sistema fue de 20 y 30 mL min<sup>-1</sup>, y los tiempos de retención hidráulica de 15 s<sup>-1</sup> y 30 min<sup>-1</sup> para los procesos de coagulación, floculación y sedimentación respectivamente se manejó un caudal de 27,30 mL/min y un tiempo de retención hidráulico de 30 minutos. Por último se manejó un caudal de 25,08 mL/min.

Tabla 1. Análisis del efluente en sistema tipo batch en los dos periodos evaluados

	TURBIEDAD	pH	CONDUCTIVIDAD	SOLIDOS	COLOR	DQO
<b>SULFATO</b>	3,77±1,34	4,22±0,03	114,97±0,67	173,42±23,15	10,21±4,22	15,14±2,86
<b>ALMIDON</b>	13,30±2,54	7,53±0,03	113,00±0,61	107,25±34,07	25,10±4,97	46,87±0,96
<b>CACTUS</b>	9,86±3,45	7,35±0,01	108,40±5,00	128,33±13,03	38,24±3,71	44,35±2,07
<b>MORINGA</b>	13,44±2,76	7,49±0,03	84,50±0,46	133,33±25,50	28,11±4,49	37,08±8,12
<b>ALGAS</b>	12,43±2,38	7,46±0,12	88,57±1,94	227,92±59,06	30,15±1,33	25,02±1,40

Fuente: elaborado por los autores

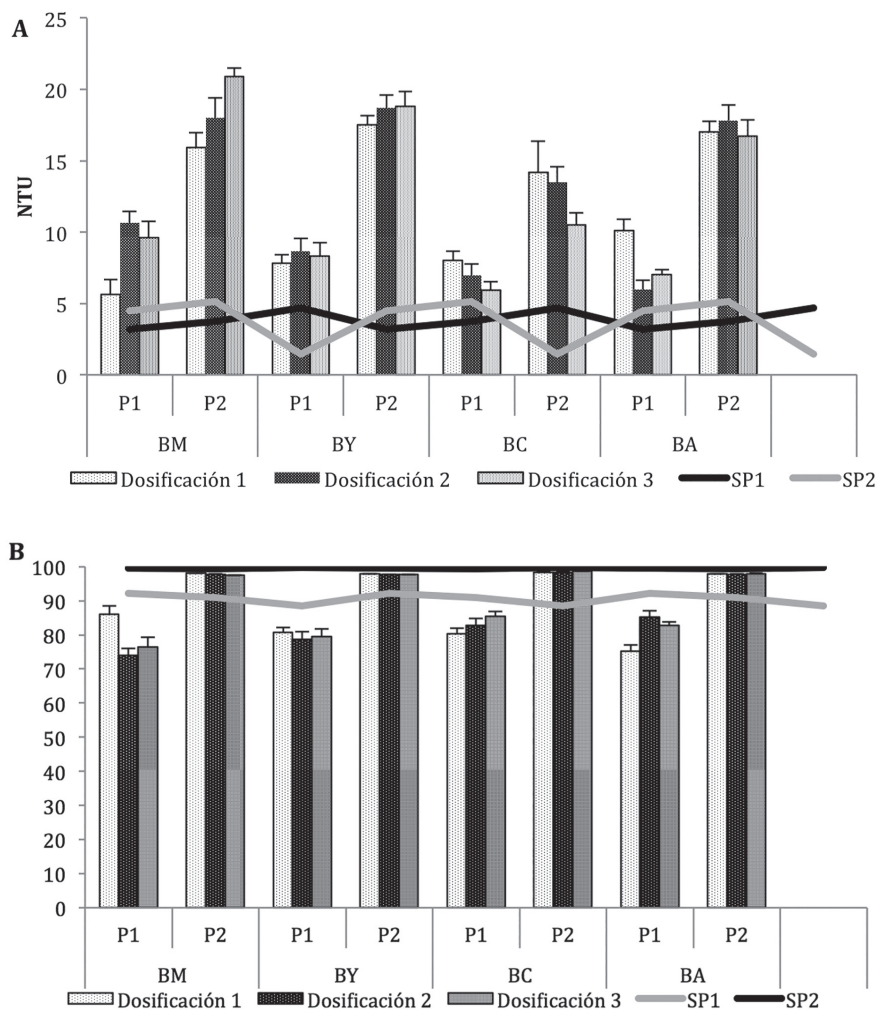


Figura 3. (A) Dosis óptima y (B) Porcentaje de remoción de las biomásas evaluadas Moringa Oleífera BM, Almidón de Yuca BY, Cactus Opuntia BC y Algas Marinas BA en los periodos seco (P1) y lluvioso (P2). Las barras representan la magnitud promedio de las concentraciones de turbiedad y las líneas acotadas la desviación estándar por encima de la media

Fuente: elaborado por los autores.

Tabla 2. Análisis del efluente en el sistema por flujo continuo en los dos periodos evaluados

	TURBIEDAD	pH	CONDUCTIVIDAD	SÓLIDOS	COLOR	DQO
<b>SULFATO</b>	18,67±3,97	4,35±0,03	252,67±6,11	222,75±30,05	13,83±3,06	21,33±12,63
<b>ALMIDON</b>	38,10±4,88	7,00±0,21	95,87±2,06	115,83±66,25	33,50±3,54	53,00±18,38
<b>CACTUS</b>	48,37±14,55	7,13±0,27	99,80±2,56	152,50±62,90	42,17±0,24	76,67±16,00
<b>MORINGA</b>	37,50±5,77	7,27±0,02	100,67±8,92	152,50±75,50	32,17±4,01	40,00±15,08
<b>ALGAS</b>	55,43±8,92	7,31±0,04	91,20±1,82	525,00±181,26	30,83±0,24	26,67±11,31

Fuente: elaborado por los Autores

En flujo continuo la turbiedad más baja la presentó el sulfato de aluminio con un valor promedio de 18.67 un NTU, seguido de moringa alífera y almidón de yuca con valores promedios de 37.50 NTU y 38.10 NTU respectivamente, demostrando el potencial que tienen como coagulante. El valor del pH disminuyó considerablemente para sulfato de aluminio hasta el valor promedio de 4.35 mientras que los demás coagulantes naturales presentaron un pH estable con valores promedios entre 7.00 y 7.31. La conductividad también aumentó significativamente para el sulfato de aluminio hasta un valor de 252.67  $\mu$ S/cm, a diferencia de los demás coagulantes naturales evaluadas que no sobrepasaron los 100.67  $\mu$ S/cm. Durante

el proceso de flujo continuo la biomasa que removió más sólidos totales fue el almidón de yuca, presentando del valor más bajo de 115.83 mg/L, mientras que el alga presentó la menor remoción con un valor promedio de 525 mg/L

La concentración más baja de color se presentó con sulfato de aluminio arrojando un valor promedio de 13,83 UC, seguido algas y moringa oleífera con valores promedios de 30,83 UC y 32,17 UC respectivamente, demostrando el potencial de remoción de cada una de estas, el valor del DQO disminuyó considerablemente para sulfato de aluminio hasta el valor promedio de 21,33 mg/L seguido del alga y la moringa con valores promedios de 26,67 mg/L y 40,00 mg/L.

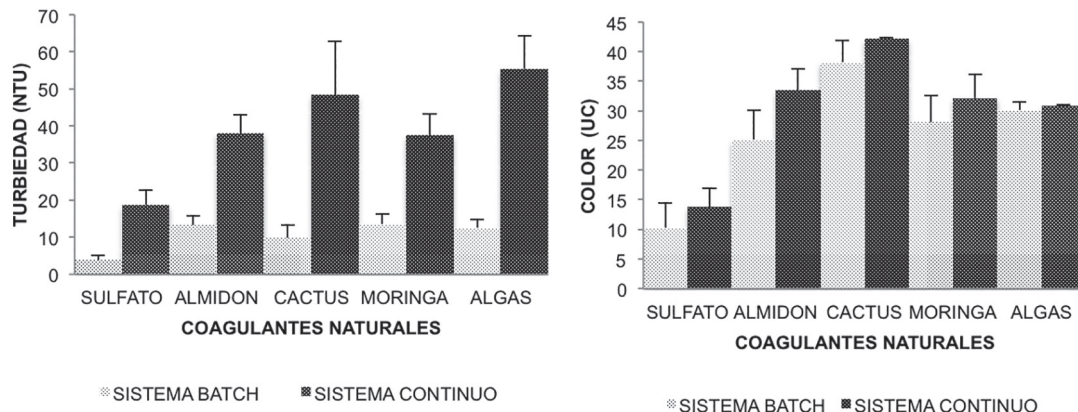


Figura 4. Análisis de las biomásas evaluadas Moringa Oleífera BM, Almidón de Yuca BY, Cactus Opuntia BC y Algas Marinas BA de los sistemas batch y continuo. Las barras representan la magnitud promedio de las concentraciones de turbiedad y color; las líneas acotadas la desviación estándar por encima de la media

Fuente: elaborado por los autores



Finalmente se logró verificar que la incorporación de coagulantes en la clarificación de las aguas para el consumo humano, como sustitutos del sulfato de aluminio en sistemas continuos, presenta remociones inferiores a las evidenciadas en el sistema batch para la mayoría de los análisis aplicados al igual que en el coagulante metálico ( $Al_3(SO_4)_3$ ) empleado como referencia, por lo que se sugiere dar continuidad a la evaluación de estos procesos para incrementar su efectividad y promover su uso.

## DISCUSIÓN

Las concentraciones iniciales y finales de turbiedad fueron similares a los reportados en los ensayos realizados por Díaz *et al.*, 2004 quienes registran valores entre 8.90 y 10.50 NTU con una turbiedad inicial de 90 NTU y Muñoz, García & Muñoz (2005), quienes reportan en sus estudio valores entre 5 y 24 NTU con turbiedad inicial de 54 NTU. El coagulante natural cactus opuntia arrojó los valores más bajos de turbiedad, convirtiéndose en el más eficiente de todos los coagulantes estudiados en esta investigación. Sin embargo Martínez, Chávez, Díaz, Chacín & Fernández (2003), registraron valores finales mas bajos (5 NTU), lo anterior se debe posiblemente a que ensayaron turbiedades iniciales (20 a 150 NTU) más bajas a las evaluadas en el presente estudio.

En cuanto a las concentraciones finales de sólidos totales, durante periodo seco y lluvioso, se evidencia una coincidencia en el comportamiento de los pre-tratamientos, con los reportes realizados para turbiedad y color en los ensayos con sistemas tipo batch; con las siguientes concentraciones para la biomasa moringa (260 y 326, 67 mg/L), almidón de yuca (304.33 mg/L, 524.17 mg/L), algas (194,17 mg/L y 208,33 mg/L) y cactus opuntia (173,33 y 390,33 mg/L), lo anterior esta dentro del intervalo de los resultados presentados por Mas y otros (2013), donde utilizan como coagulante natural la moringa, y reportan concentraciones finales después del tratamiento de 580 mg/L, manejando una concentración inicial de 810 mg/L, donde

los ensayos realizados en esta investigación presentan en muchos casos concentraciones menores a este reporte.

El comportamiento presentado por el pH durante los ensayos batch y continuo son similares a los presentados por Nadabigensere & Narasiah (1998), quien es su investigación reportaron que las semillas moringa oleífera no afectan significativamente los valores de pH. También es importante resaltar que los valores se mantuvieron que los valores generan condiciones óptimas para el proceso de clarificación del agua, logrando una mayor formación de floculos capaces de precipitar y remover las partículas suspendidas presentes en el agua (Gurdián & Coto, 2011). Asociado a esto, se tiene que los coagulantes químicos son mas efectivos cuando el agua a tratar tiene un pH que oscila entre 5.5 y 8.0 unidades (Rodríguez, 2008), y el cactus Opuntia uno de los coagulantes naturales de origen natural evaluados se comporta en forma eficaz cuando el agua presenta rangos de pH que oscilan entre 7.0 y 10.0 unidades (Yin, 2010).

Las unidades formadoras de color son cercanos a los presentados por Jahn (1988) y Muñoz (2005) quienes presentaron valores finales de color cercanos al limite superior (10 y 30 UPC) de los reportados en este estudio, esto posiblemente obedece a que ellos trabajaron una concentración inicial de 50 UPC. Lo anterior nos permite confirmar nuevamente la capacidad de remoción de color de la biomasa de origen vegetal para la clarificación de las aguas.

Las dosis óptimas obtenidas por Ndabigengesere, Narasiah & Talbot, (1995) y Schwarz (2000), fueron de 50 mg/L y las de Asrafuzzaman (2011), fueron (50 y 100 mg/L) cercanas a las ensayadas en la dosificación de este estudio, permitiendo así verificar una vez más los rendimientos de los coagulantes naturales evaluados. La eficiencia de remoción de turbiedad de los coagulantes evaluados son similares a los presentados en estudios realizados para moringa oleífera con valores entre 80 y 90% y condiciones finales de 49,0 NTU (Pritchard *et al.*, 2009; Amagloh y Benang, 2009) y para *cactus stenocereus*

*griseus* con valores de 69,27 y 96,46% (Fuentes, Mendoza, López, Castro & Urdaneta, 2011).

Según los resultados arrojados en la investigación (Olivero, Mercado & Montes, 2013) el sulfato de aluminio disminuye el valor del pH a diferencia de los coagulantes naturales seleccionados en esta investigación que no presenta alteraciones sobre el comportamiento de este parámetro; de la misma manera se logra comprobar que los resultados obtenidos de los parámetros de turbiedad y sólidos totales presentan valores semejantes a los obtenidos por Castellanos, Becerra, Carreño & Páez, en el 2012 quienes reportan remociones del 90,3% y 74,3% respectivamente, frente a concentraciones iniciales similares al periodo lluvioso de la presente investigación.

## CONCLUSIONES

Los coagulantes naturales más eficientes en el proceso de coagulación en sistema tipo batch, fueron el cactus opuntia (98,69%) y la moringa oleífera (98,32%), logrando las mejores remociones de turbiedad en comparación con los demás coagulantes naturales algas y almidón, con una dosis óptima de 100 mg/L. El coagulante moringa oleífera demostró su eficacia utilizando  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  como pre-tratamiento, mientras que el almidón de yuca reaccionó de manera favorable con NaOH, las algas utilizan  $\text{CaCl}_2$  para presentar sus mejores resultados y el cactus opuntia no requiere tratamiento.

En cuanto a los resultados observados en el sistema continuo se demostró que el coagulante más efectivo para este tipo de sistemas fue la moringa oleífera (95,31%), respaldando el resultado logrado en sistema batch; seguidos por almidón (95,23%), cactus opuntia (93,95%), y algas marinas (93,07%). La eficiencia de remoción por parte de los coagulantes naturales seleccionados para este estudio presenta resultados efectivos para la implementación en sistemas continuos, garantizando su efectividad en este proceso.

Los coagulantes naturales que se analizaron en esta investigación necesitan mayor tiempo de contacto con el agua para un mejor resultado; a diferencia del sulfato de aluminio que en poco tiempo de contacto con el agua, muestra su eficiente facultad para la remoción de turbiedad. También se encontró que todos los coagulantes naturales empleados son eficientes, seguros, económicos y no afectan significativamente las variables (pH, conductividad y OD) en el tratamiento de las aguas de consumo, con una menor generación de lodos, gracias a los mecanismos de adsorción y la neutralización de cargas que ofrecen las biomásas de origen vegetal. De tal forma que cada uno de los coagulantes naturales evaluados, constituye una buena alternativa para algunas zonas rurales y periurbanas donde no es posible hacer llegar los coagulantes químicos.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Amagloh, F., & Benang, A. (2009). Effectiveness of Moringa oleifera seed as coagulant for water purification. *African Journal Of Agricultural Research*, 119 - 123. Disponible en: [http://www.sswm.info/sites/default/files/reference\\_attachments/AMAGLOH%20BENANG%202009%20Effectiveness%20of%20Moringa%20Seed%20as%20Coagulant%20for%20Water%20Purification.pdf](http://www.sswm.info/sites/default/files/reference_attachments/AMAGLOH%20BENANG%202009%20Effectiveness%20of%20Moringa%20Seed%20as%20Coagulant%20for%20Water%20Purification.pdf)
- Asrafuzzaman, M., Fakhuruddin, A., & Alamir, M. (2011). Reduction of turbidity of water using locally available natural coagulants. *Int. Scholarly Res. Network. Microbiology*, 6. Disponible en: <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/23724307>
- Barth, H.; Habs, M.; Klute, R.; Müller, S. & Tauscher, B. (1982). Trinkwasseraufbereitung mit sa-men von Moringa oleifera lam. *Chemiker-Zeitung (Drinking Water Treatment with Moringa oleifera Seeds)*. *Chemists Newspaper*, 106, 75-78. Disponible en: [http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci\\_nlinks&ref=000079&pid=SI909-0455201400010000100005&lng=en](http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_nlinks&ref=000079&pid=SI909-0455201400010000100005&lng=en)

- Cabrera, R. (2009). *Utilización de coagulantes naturales para la potabilización del agua*. Universidad de Zulia.
- Castellanos, M., Becerra, N., Carreño, L., & Páez, L. (2012). Estudio comparativo de la acción coagulante-floculante del mucílago de opuntia focus por los métodos: coagulación y electrocoagulación en los lixiviados del relleno sanitario Pírgua de Tunja. *Revista AIDIS de Ingeniería y Ciencias Ambientales: Investigación, desarrollo y práctica*, 44 - 55. Disponible en: <http://www.revistas.unam.mx/index.php/aidis/article/view/05>
- Díaz, A., Arias, J., Glevez, G., Maldonado, A., Laverde, D., Pedraza, J., & Escalante, H. (2003). Biosorción de Fe, Al y Mn de drenajes ácidos de mina de carbón empleando Algas Marinas sargassum sp. en procesos continuos. *Revista Facultad de ingeniería - Universidad de Antioquia*, 24 - 48. Disponible en: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=43003004>
- Dorea, C. (2006). Use of Moringa spp. seeds for coagulation: a review of a sustainable option. *Water Science*, 219 - 227. Disponible en: <http://ws.iwaponline.com/content/6/1/219>
- Fuentes, L., Mendoza, I., López, A., Castro, M., & Urdaneta, C. (2011). Efectividad de un coagulante extraído de *Stenocereus griseus* (Haw) Buxb. en la potabilización del agua. *Revista Técnica de la Facultad de Ingeniería - Universidad de Zulia*, 48 - 56. Disponible en: <http://www.elaguapotable.com/Efectividad%20de%20un%20coagulante%20extra%C3%ADdo%20de%20Stenocereus.pdf>
- Galvis, R., Ortega, C., & Rondon, Y. (2011). *Coagulantes naturales de origen vegetal*. Universidad del Tolima - Facultad de Ciencias Básicas.
- García, F. (2007). Metodología de extracción in situ de coagulantes naturales para la clarificación de agua superficial y aplicación en países en vía de desarrollo. I - 5. Disponible en: [https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/12458/Tesis%20de%20Master\\_BEATRIZ%20GARCIA%20FAYOS.pdf?sequence=1](https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/12458/Tesis%20de%20Master_BEATRIZ%20GARCIA%20FAYOS.pdf?sequence=1)
- Ghebremichael, A.; Gunaratna, R.; Henriksson, H.; Brumer, H.; & Dalhammar, G. (2005). A simple purification and activity assay of the coagulant protein from *Moringa oleifera* seed. *Water Res.* 39:2338-2344. Disponible en: <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/15921719>
- Gómez, G. (2010). Eficiencia del coagulante de la semilla de *Moringa oleifera* en el tratamiento de agua con baja turbidez. *Escuela Agrícola Panamericana Zamorano, Honduras*, pág. 14. Disponible en: <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/15921719>
- Gurdián, R., & Coto, J. (2011). Estudio preliminar del uso de la semilla de tamarindo (*Tamarindus indica*) en la coagulación-floculación de aguas residuales. *Tecnología en Marcha*, 18 - 26. Disponible en: [http://revistas.tec.ac.cr/index.php/tec\\_marcha/article/view/138](http://revistas.tec.ac.cr/index.php/tec_marcha/article/view/138)
- Guzmán, L., Villabona, A., Tejada, C., & García, R. (2013). Reducción de la turbidez del agua usando coagulantes naturales. *Rev. U.D.C.A. Act. & Div. Cient.*, 253 - 262. Disponible en: [http://www.scielo.org.co/scielo.php?pid=S0123-42262013000100029&script=sci\\_arttext](http://www.scielo.org.co/scielo.php?pid=S0123-42262013000100029&script=sci_arttext)
- Hamidi, A. y Koffly, M. (1998). The use of sago starch as coagulant aid in water and wastewater treatment. *Bulletin Institution of Engineers Perak*. 27-31. Disponible en: [http://nopr.niscair.res.in/bitstream/123456789/24395/1/IJEMS%207\(4\)%20195-199.pdf](http://nopr.niscair.res.in/bitstream/123456789/24395/1/IJEMS%207(4)%20195-199.pdf)
- Huda, J.; Kristin, A.; McCullough, L.; Velegol, D. & Velegol, S. (2012). Antimicrobial Sand via Adsorption of Cationic *Moringa oleifera* Protein. *Langmuir*, 28(4), 2262-2268. Disponible en: <http://pubs.acs.org/doi/abs/10.1021/la2038262>
- Jahn, S. (1988). Using *Moringa* seeds as coagulants in developing countries. En: J. Am. Wat.

- Wks Assoc. Vol. 80(6), 43–50. Disponible en: HYPERLINK “<http://www.ircwash.org/resources/using-moringa-seeds-coagulants-developing-countries>” <http://www.ircwash.org/resources/using-moringa-seeds-coagulants-developing-countries>
- Kawumura, S. (1991). Effectiveness of natural polyelectrolytes in water treatment. *Journal of American Water Works Association*, 88-91. Disponible en: [https://www.researchgate.net/publication/241665616\\_Effectiveness\\_of\\_Natural\\_Polyelectrolytes\\_in\\_Water\\_Treatment](https://www.researchgate.net/publication/241665616_Effectiveness_of_Natural_Polyelectrolytes_in_Water_Treatment)
- Martínez, D., Chávez, ..., Chacín, E., & Fernández, N. (2003). Eficiencia del cactus lefaria para uso como coagulante en la clarificación de aguas. *Revista Técnica de la Facultad de Ingeniería - Universidad de Zulia*, 27 - 33. Disponible en: [http://www.scielo.org.ve/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0254-07702003000100005](http://www.scielo.org.ve/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0254-07702003000100005)
- Martínez, G., & gonzález, S. (2012). *Evaluación del poder coagulante de la tuna (opuntia ficus indica) para la remoción de turbidez y color en aguas crudas*. Universidad de Cartagena. Disponible en: [http://190.25.234.130:8080/jspui/bitstream/11227/137/1/EVALUACION%20DEL%20PODER%20COAGULANTE%20DE%20LA%20TUNA%20\(Opuntia%20ficus%20indica\)%20PARA%20LA%20REMOCION%20DE%20TURBIDEZ%20Y%20COLOR%20EN%20AGUAS%20CRUDAS..pdf](http://190.25.234.130:8080/jspui/bitstream/11227/137/1/EVALUACION%20DEL%20PODER%20COAGULANTE%20DE%20LA%20TUNA%20(Opuntia%20ficus%20indica)%20PARA%20LA%20REMOCION%20DE%20TURBIDEZ%20Y%20COLOR%20EN%20AGUAS%20CRUDAS..pdf)
- Mas, M., Carrasquero, S., Martínez, D., Mejía, D., & Vargas, L. (2013). Eficiencia de las semillas de Moringa oleifera como coagulante orgánico en la remocion de metales en aguas de baja turbiedad. *Revista tecnocientífica - Universidad Rafael Urdaneta*. Disponible en: [http://www.scielo.org.co/scielo.php?pid=S1909-04552014000100001&script=sci\\_arttext](http://www.scielo.org.co/scielo.php?pid=S1909-04552014000100001&script=sci_arttext)
- Miller, S., Fugate, E., Craver, V., Smith, j., & Zimmerman, J. (2008). Toward understanding the efficacy and mechanism of Opuntia ssp. as a natural coagulant for potential application in water treatment. *Enviromental Science & Tecnology.*, 4274 - 4279. Disponible en: <http://pubs.acs.org/doi/abs/10.1021/es7025054?journalCode=esthag>
- Mintz, E., Bartram, G., Lochery, P., & Wegelin, M. (2001). No just a drop in the bucket: expanding access to point-of-use water treatment systems. *American Journal of Public Health*, 1565 - 1570. Disponible en: <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/11574307>
- Molano, M. (2011). Las semillas de Moringa oleifera como alternativa de coagulante natural para purificación de agua. *Universidad industrial de Santander*. Disponible en: <http://repositorio.uis.edu.co/jspui/bitstream/123456789/7112/2/142202.pdf>
- Muñoz, R. S., Garcia, R., & Muñoz, M. R. (2005). Empleo de un producto coagulante natural para clarificar agua. *Revista CENIC Ciencias Químicas - Cuba*. Disponible en: <http://www.redalyc.org/pdf/1816/181620511037.pdf>
- Ndabigengesere, A., & NArasiah, K. (1998). Quality of water treated by coagulation using Moringa oleifera seeds. *Water Research*, 781 - 791. Disponible en: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0043135497002959>
- Ndabigengesere, A., Narasiah, K., & Talvot, B. (1995). Active agents and mechanism of coagulation of turbid waters using Moringa oleifera. *Water Research*, 7. Disponible en: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/004313549400161Y>
- Nirmala, R., & Jadhav, M. (2012). Enhancing filtrate quality of turbid water incorporating seeds of Strushnos potatorum, pads of Cactus opuntia and mucilage extracted from the fruits of Coccina indica as coagualnts. *Journal of enviromental research*, 668 - 1674. Disponible en: <file:///C:/Users/acer/Downloads/JeradDLId0668vol007issue002.pdf>

- Okuda, T.; Baes, A.; Nishijima, w.; Okada, M. (2001). Isolation and characterization of coagulant extracted from *Moringa oleifera* seed by salt solution. *Wat. Res.* 35:405-410. Disponible en: <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/11228992>
- Olivero, V., Mercado, M., & Montes, G. (2013). Remoción de la turbidez del agua del río Magdalena usando el mucilago del nopal *Opuntia ficus-indica*. *Producción + Limpia*, 19. Disponible en: [http://www.scielo.org.co/scielo.php?pid=S1909-04552013000100003&script=sci\\_arttext](http://www.scielo.org.co/scielo.php?pid=S1909-04552013000100003&script=sci_arttext)
- Parra, Y., Cedeño, M., García, M., Mendoza, I., González, Y. & Fuentes, L. (2011). Clarificación de aguas de alta turbidez empleando el mucílago de Opuntia wentiana. *Redieluz*, 27 - 33. Disponible en: <http://www.produccioncientifica.luz.edu.ve/index.php/redieluz/article/view/521>
- Poumaye, N.; Mabingui, J.; Lutgen, P. & Bigan, M. (2012). Contribution to the clarification of Surface water from the Moringa Oleifera: Case M' Poko River to Bangui, Central African Republic. *Chemical Engineering Research and Design*, 90, 2346-2352. Disponible en: [http://www.cherd.ichemejournals.com/article/S0263-8762\(12\)00219-5/abstract](http://www.cherd.ichemejournals.com/article/S0263-8762(12)00219-5/abstract)
- Pichler, T., Young, K., & Alcantar, N. (2012). Eliminating turbidity in drinking water using the mucilage of a common cactus. *Water Science and Technology*, 179 - 186. Disponible en: <http://www.geochemie.uni-bremen.de/pdf/pichler/WS%202012%20Mucilage.pdf>
- Prado, H.; Matulewicz, M.; Bonelli, P. & Cukier-Man, A. (2011). Potential use of a novel modified seaweed polysaccharide as flocculating agent. *Desalination*, 281:100-104. Disponible en: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0011916411006758>
- Pritchard, M., Mkandawire, T., Edmondson, A., O'Neill, J., & Kululanga, G. (2009). Potential of using plant extracts for purification of shallow well water in Malawi. *Phys. chem. Earth*, 799 - 805. Disponible en: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S147470650900059X>
- Quintana, R. (2000). Cómo tratar el agua. *Documento técnico - Coca Cola de Colombia*. Disponible en: [http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci\\_nlinks&ref=000101&pid=S0012-7353201100010000200006&lng=es](http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_nlinks&ref=000101&pid=S0012-7353201100010000200006&lng=es)
- Rodiño, J.; Fera, J.; Paternina, R. & Marrugo, J. (2015). Sinú River raw water treatment by natural coagulants. *Revista Facultad de Ingeniería, Universidad de Antioquia*, No. 76, pp. 90-98, 2015. Disponible en: <http://aprendeenlinea.udea.edu.co/revistas/index.php/ingenieria/article/view/21167>
- Rodríguez, C. (2008). Uso y control del proceso de coagulación en plantas de tratamiento de agua potable. *Universidad de sucre - Sincelejo*. Disponible en: <http://repositorio.unisucre.edu.co/bitstream/001/298/2/628.162R696.pdf>
- Rodríguez, M.; Lugo, U.; Rojas, C. & Malaver, C. (2007). Evaluación del proceso de la coagulación para el diseño de una planta potabilizadora. *Umbral Científico*, 11:8-16. Disponible en: <http://www.redalyc.org/pdf/304/30401102.pdf>
- Schwarz, D. (2000). Water clarification using moringa oleifera. *Gate informacion service*. Disponible en: [http://www.sswm.info/sites/default/files/reference\\_attachments/SCHWARTZ%202000%20Water%20Clarification%20Using%20Moringa%20Oleifera.pdf](http://www.sswm.info/sites/default/files/reference_attachments/SCHWARTZ%202000%20Water%20Clarification%20Using%20Moringa%20Oleifera.pdf)
- Solís, R., Laines, C., & Hernández, J. (2012). Mezclas con potencial coagulante para clarificar aguas superficiales. *Division académica de Ciencias Biológicas - Universidad Juárez*, 229 - 236. disponible en: <http://www.revistas.unam.mx/index.php/rica/article/download/32535/30332>
- Villanueva, H., & Tapian, N. (2007). Biosorción de cobre (II) por biomasa pretratada de cáscara de Citrus sinensis (naranja),



citrus limonium (limon) y opuntia ficus (palmeta de nopal). *Universidad Nacional Mayor de San Marcos - Lima*. Disponible en: <http://cybertesis.unmsm.edu.pe/handle/cybertesis/2112>

Yin, C. (2010). Emerging usage of plant-based coagulants for water and wastewater treatment. *Process Biochemistry*, 1437 - 1444. Disponible en: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1359511310002114>